

論文題目：圧電インパクト駆動を用いた超精密 XY ステージと微小液滴塗布機構の開発

氏名：入江優花

大学名：国立大学法人電気通信大学

研究科名：電気通信学研究科

論文：博士（工学）の学位申請論文

年月：2015 年 9 月

論文題目：圧電インパクト駆動を用いた超精密 XY ステージと微小液滴塗布機構の開発
博士論文審査委員会

審査委員氏名：

小池卓二教授

横井浩史教授

明愛国教授

金森哉史教授

青山尚之教授（主査）

著作権所有者

氏名：入江優花

2015 年 9 月 16 日

Development of Impact Piezo-Driven Precise Miniature XY Stage and Micro Dispenser

Yuuka Irie

Abstract

One of the latest technical trends in the micro production is the development of the special mechanism to manipulate, handle and transport such the small parts, because many of products such as cellular phones and DVD players are composed of several small micro components that should be assembled with much higher accuracy to the dimension of parts. The compact and highly accurate positioning system and dispenser can be proposed to provide the function of accurate parts assemble.

The paper proceeds as follows.

In chapter 1, an introduction is given, where the background and the purpose of the study are described.

In chapter 2, development of the unique micro XY stage system which is incorporated with the inertia driven micro sliders on V-shaped grooves and the micro part handling device is described. The XY stage system was easily assisted with the laser interferometer to get the fine position measurement. And it succeeded in align the target micro lens at the center of the reference lens axis with observing the laser interference fringe.

In chapter 3, at first, a principle of the needle type dispenser device is described. The gap between the needle tip and the target surface should be controlled for micro-droplet dispensation. A contact-detection method of the needle-tip droplet and the target surface is proposed. Contact of the needle-tip droplet with the target surface can be detected by needle-vibration characteristics. The needle-vibration displacement is decreasing as the gap between the needle tip and the target surface is narrowing from 0.100 mPas to 100.000 mPas. The gap can be controlled to approximately 5 % of the needle diameter in 100 μm and using the needle-vibration displacement.

In chapter 4, development of a dispensing mechanism comprising a dispensing device and XY stage, both driven by the piezo impulsive force is described. First, the appropriate waveform for controlling the piezoelectric element that can drive the small slider with the needle is discussed. In the primary experiment, the small array of the 0.2-picoliter micro droplet is successfully achieved on the glass plate with 50 μm of space.

In chapter 5, conclusions are given.

圧電インパクト駆動を用いた超精密XYステージと微小液滴塗布機構の開発

入江優花

本論文では、圧電インパクト駆動を用いた2つの精密位置決め機構とその応用について論じている。近年、情報端末機器などに搭載されている様々なデバイス、アクチュエータやセンサ、レーザ、レンズ、電子部品、機械部品等は微小化が進み、その位置決めや組立は非常に困難になっている。たとえば、接着作業では、接着される部品同士が微小であり、このように微小部品のハンドリング、位置決めおよび極微量の接着剤塗布などが重要となる。従来の技術を用いて、これらの問題を解決しようとするれば、いくつかの装置を組み合わせる利用することになり、精度や機械剛性の低下に繋がり、システムの大型化が避けられない。また、部品の位置決め時や接着時の検査・観察系を組み込むことが、物理的スペースから困難となる場合が多い。これらを解決するためには、従来よりも小型・精密な位置決め機構、塗布機構などが必要となっている。

本論文では圧電インパクト駆動に着目し、まず圧電素子にのこぎり波形状の駆動電圧を与えた場合の移動体の移動量について運動方程式を用いて解析を行っている。次にこの結果に基づいて V 溝 XY ステージを試作している。ここでは V 溝 XY ステージの位置決め性能を測定し、X、Y ステージ共に、最小位置決め分解能 75nm を有することを確認した。このステージを用いた精密応用実験として、レンズ把持部をステージ上に搭載し、超小型レンズの調芯作業が可能であることを明らかにした。次にニードル式液滴塗布機構について検討を行った。まずこの方法の原理と構成について述べ、塗布量を左右するさまざまな条件を実験的に求めている。そしてこの方法を用いた場合、塗布量の精度に影響するニードル先端の接触計測法について論じている。ニードルを機械共振機構で微小振動させ、先端部の液滴が対象物に接触した瞬間に機械共振点を変化することを利用して、接触検知を行っている。この振動系モデルによる解析とその特性を実験的に明らかにしている。次に圧電インパクト駆動されたニードルを用いて液体を基板へ転写する微小液滴塗布機構について論じている。ここでは駆動波形を先端突起付き矩形波形とし、得られる加速度の差から移動体の締め付け力を決定し、微小液滴塗布機構を試作した。微小液滴塗布機構の塗布性能を評価し、V 溝 XY ステージ上に配置することで、微小液滴塗布装置を構成した。ニードル直径、液体粘度を変化させて塗布実験を行い、高粘度導電ペースト (50,000mPas) を直径 12 μ m で塗布することに成功した。

本論文は 5 章で構成する。各章の概要は以下の通りである。

第 1 章「緒論」では、デバイスの小型化に伴う超精密組立作業の重要性について概観する。そして本研究の位置づけと目的を明らかにし、本論文の構成および各章の概要について述べる。

第 2 章「圧電インパクト駆動による Blu-ray Disc 用ピックアップレンズの調芯機構」では、最初に圧電インパクト駆動による超精密位置決め動作原理を説明する。圧電素子の駆動電圧波形に、のこぎり波形を用いた場合の駆動周波数と移動体の移動量の関係について示す。

この方式を Blu-ray Disc 用ピックアップレンズの調芯機構に適用し、開発した圧電インパクト駆動式 V 溝 XY ステージについて説明している。V 溝 XY ステージの位置決め性能について計測結果を示し、X、Y ステージそれぞれの最小位置決め分解能を明らかにしている。レンズ把持部を V 溝 XY ステージ上に搭載し、レンズ調芯用の V 溝 XY ステージ機構を構成している。レンズ把持部搭載後の V 溝 XY ステージの位置決め性能、把持によるレンズの傾きについて実験評価し、位置決め分解能 85nm、レンズ傾斜角度 0.01 度以下の良好な結果を得た。レーザ干渉計（青色、波長 405nm）を用いて干渉縞を観察しながら XY ステージを駆動させて実際にレンズ調芯を行い、偏芯のない位置決め成功していることを述べている。

第 3 章「ニードル式液滴塗布装置とニードル先端接触検知法」では、まずニードル式液滴塗布装置の液滴塗布原理について述べる。塗布液体はピペット内に充填されており、この中をニードルが貫通し、ニードル先端部に付着した液体が塗布基板上へ転写されて塗布が行われる。ここでは液体粘度、ニードル直径、ニードル先端と塗布対象面との間隔などに関して、塗布量との関係を実験的に求めている。この際、ニードルが塗布基板に衝突すればニードルおよび塗布基板の損傷となる。ニードル先端部を塗布基板に接触させることなく、塗布を行う必要がある。そこでニードル先端部に付着した液体の塗布基板上への接触検知方法に着目し、オンマシンで接触検知する方法を提案している。ここではニードルを機械共振機構で微小振動させ、先端部の液滴が対象物に接触した瞬間に機械共振点が変わることを利用して、接触検知を行っている。ニードル直径、液体粘度、塗布基板を変化させて、ニードル先端液滴の塗布基板への接触検知実験を行っている。ニードル直径 100 μ m を用いてシリコンオイル粘度 100~100,000mPas の高粘度液体を用いて実験を行い、接触時に共振周波数や振幅の変化から、ニードル先端部の液滴が塗布基板への接触した瞬間の検知に成功している。またニードル振動を用いた塗布により、塗布した液滴の直径ばらつきを低減することができたことを記している。

第 4 章「圧電インパクト駆動による微小液滴塗布機構」では、微小液滴塗布機構に用いる圧電インパクト駆動の動作原理について述べる。まず圧電素子に印加する駆動電圧波形に着目し、先端突起付き矩形波を提案し、従来ののこぎり波形との特性の相違について比較し、得られる加速度成分について説明している。得られた加速度から移動体の締め付け力を決定し、圧電インパクト駆動式微小液滴塗布機構を試作している。試作機に先端突起付き矩形波を入力し、移動性能評価実験を行い、1 μ m の位置決め分解能が得られている。さらに圧電インパクト駆動される V 溝 XY ステージと組み合わせて微小液滴塗布装置を構成した。ニードル直径と液体粘度を変化させて、塗布実験を行っている。本試作機を用いて高粘度導電ペースト（50,000mPas）を直径 12 μ m で塗布することに成功しており、このことにより低抵抗パターン等で重要視されている高粘度液体の微量塗布が実現し、その実用化が期待できる。また圧電インパクト駆動式微小液滴塗布機構は小型であるため、複数台配置することで高効率な塗布が実現できることが期待される。

第 5 章「結論と今後の課題」では、本章では本論文をまとめるとともに今後の課題について論じる。

緒論では本研究の背景や関連研究を概観するとともに従来の精密位置決め機構の問題点を指摘し、可動範囲の増加、操作性向上、装置の小型化の機能が要求されていることを述べている。次に微量の液滴塗布技術について、超精密位置決め機構と極細ニードルを用いて液滴を転写する方法について説明し、ニードル先端と塗布面との接触検知の重要性を述べて、既存の接触検知手法について紹介している。また、ニードル式液滴塗布機構では、ニードル駆動ストロークの増加、高分解能位置決め、小型化が要求されていることから、ニードル駆動に圧電インパクト駆動方式を適用することでこれらの要求を満たすことができると考えた。

圧電インパクト駆動による Blu-ray Disc 用ピックアップレンズの調芯機構では、最初に圧電インパクト駆動による超精密位置決め動作原理について説明している。圧電素子の駆動電圧波形に、のこぎり波形を用いた場合の駆動周波数と移動体の移動量の関係について示し、圧電インパクト駆動式 V 溝 XY ステージを試作した。レンズ把持部を V 溝 XY ステージ上に搭載し、レンズ調芯用の V 溝 XY ステージ機構を構成した。V 溝 XY ステージ機構は、位置決め分解能 85nm、レンズ傾斜角度 0.01 度以下の良好な結果を得た。レーザ干渉計（青色、波長 405nm）を用いて干渉縞を観察しながら XY ステージを駆動させて実際にレンズ調芯を行い、偏芯のない位置決めに成功した。

ニードル式液滴塗布装置のニードル先端位置計測では、ニードル式液滴塗布装置の液滴塗布原理について述べ、ニードル先端部に付着した液体の塗布基板上への接触検知方法を提案した。ニードルを機械共振機構で微小振動させ、先端部の液滴が対象物に接触した瞬間に機械共振点が変わることを利用して、接触検知することができた。ニードル直径 100 μ m を用いてシリコンオイル粘度 100～100,000mPas の高粘度液体を用いて実験を行い、接触時に共振周波数や振幅の変化から、ニードル先端部の液滴が塗布基板への接触した瞬間の検知に成功している。またニードル振動を用いた塗布により、塗布した液滴の直径ばらつきを低減することができた。

圧電インパクト駆動による微小液滴塗布機構では圧電素子の駆動電圧波形について、のこぎり波と先端突起付き矩形波を加速度に着目して比較考察を述べている。試作した 2 つの機構について、位置決め性能を明らかにし、実用性について検討している。応用実験では圧電インパクト駆動方式で極細ニードルを高粘度導電性ペースト（50,000mPas）の充填されたピペット内に貫通させて、極微量（直径 12 μ m）の液体の塗布に成功した。

目次

第 1 章 緒論.....	1
1.1 はじめに.....	1
1.2 小型で精密な位置決め機構.....	5
1.3 新たな製造装置の必要性と要求仕様.....	10
1.4 研究目的.....	12
1.5 論文の構成.....	12
第 2 章 圧電インパクト駆動による Blu-ray Disc 用ピックアップレンズの調芯機構.....	15
2.1 はじめに.....	15
2.2 圧電インパクト駆動の動作原理.....	20
2.2.1 緩慢動作時.....	20
2.2.2 急速動作時.....	21
2.3 摩擦係数の測定.....	26
2.4 予備実験.....	28
2.4.1 実験条件.....	28
2.4.2 緩慢動作時の実験.....	28
2.4.3 急速動作時の実験.....	28
2.5 仕様設計.....	32
2.6 V 溝 XY ステージ設計のための移動量計算シミュレーション.....	35
2.7 V 溝 XY ステージの試作.....	37
2.8 V 溝 XY ステージの移動性能評価.....	39
2.9 レンズ把持部の試作.....	49
2.10 レンズ把持部搭載後の V 溝 XY ステージの移動性能評価.....	52
2.11 V 溝 XY ステージ機構を用いた Blu-ray Disc 用ピックアップレンズの調芯.....	57
2.12 まとめ.....	60
第 3 章 ニードル式液滴塗布装置とニードル先端接触検知法.....	61
3.1 はじめに.....	61
3.2 ニードル式液滴塗布装置.....	64
3.3 ニードル振動特性変化を用いた液滴と塗布面との接触検知の原理.....	68
3.4 ニードル振動特性の数値計算シミュレーション.....	70
3.5 ニードル振動特性変化を用いた液滴と塗布面との接触検知機構の試作.....	75
3.6 校正方法.....	78
3.7 液滴と塗布面との接触・非接触における周波数特性の変化.....	82

3.8	ステージ式ニードル振動機構の試作.....	85
3.9	塗布ギャップの違いによる周波数特性の測定.....	87
3.10	ニードル振動変位と塗布ギャップの関係.....	91
3.11	四角系ホルダー式ニードル振動機構による検知実験..	95
3.12	粘度変化における接触検知実験（ニードルφ500μm）..	99
3.13	粘度変化における接触検知実験（ニードルφ100μm）..	103
3.14	ニードル振動を用いた液滴塗布量の評価.....	109
3.15	まとめ.....	119
第 4 章	圧電インパクト駆動による微小液滴塗布機構.....	120
4.1	はじめに.....	120
4.2	圧電インパクト駆動による微小液滴塗布機構の構成.....	122
4.3	塗布原理.....	124
4.4	微小液滴塗布機構に用いる圧電インパクト駆動の動作原理.....	126
4.5	インパクト駆動に適した波形.....	129
4.6	試作した圧電インパクト駆動式微小液滴塗布機構の構成.....	132
4.7	駆動システム構成.....	136
4.8	予備実験.....	138
4.9	微小液滴塗布装置用 XY ステージ.....	145
4.10	微小液滴塗布実験.....	147
4.11	まとめ.....	157
第 5 章	結論.....	158
5.1	おわりに.....	158
5.2	今後の課題.....	159
	謝辞.....	160
	参考文献.....	161

第1章 緒論

1.1 はじめに

近年、タブレット PC やスマートフォンのようなモバイル機器や、スマートウォッチのようなウェアブル機器の普及がめざましく、新たなエレクトロデバイスも次々に製品化されている（図 1-1、1-2）。機器のモバイル・ウェアブル化において、そこに組み込まれる様々なデバイス、アクチュエータやセンサ、レーザ、レンズ、電子部品、機械部品等のダウンサイジングが進み、それら構成部品の位置決めや組立は非常に困難になっている（図 1-3、1-4）。たとえば、部品の接着工程では、接着される部品同士が微小であり、①部品の位置決め、②接着剤の微量塗布などが問題となっている（図 1-5、1-6）。

従来の技術を用いて、これらの問題を解決しようとするれば、いくつかの装置を組み合わせる利用することになり、機械剛性や精度は下がり、操作性・汎用性の低下、システムの大型化が避けられない。また、部品の位置決め時や接着時の検査・観察系を組み込むことが、物理的スペースから困難となる場合も多い。これらを解決するためには、従来よりも小型で精密な位置決め機構、接着剤塗布機構などが必要となる。また、モバイル・ウェアブル機器の特徴は、小型・低電力・低価格であり、これらの製品は、少量多品種生産であることが多い[1-1]。このため、その製造装置や検査装置には、高精度であり汎用性が高く、かつ、装置価格は安いという難しい仕様が求められている。また製造・検査装置の完全自動化はコスト高となる。そこで新興国での半自動化生産という方法が現在の主流となっている。

企業名 (国名)	製品名	タイプ	発表日等	概要・特徴
Fitbit (米国)	Fitbit One Fitbit Flex Fitbit Force	Fitbit Oneはクリップ型 Fitbit Flex及びFitbit Forceはリストバンド型	Fitbit One 2012年9月 Fitbit Flex 2013年5月 Fitbit Force 2013年10月	Fitbit Oneはベルトなどに装着するタイプ、Fitbit Flex、Fitbit Forceはリストバンド型の活動量計。歩数、距離、消費カロリー、登った階数を記録してスマートフォンやタブレット端末、PCとワイヤレスで同期をして、目標管理などが可能。また、睡眠サイクルを記録して、快適に眠るためのヒントを示す。目標達成のアラート機能、家族・友人とのスコア比較機能の他、Web上では食事の記録などもして活動量データと合わせて健康管理をすることができる。 Fitbit Flexはソフトバンクモバイル健康管理サービス「ソフトバンク ヘルスケア」の端末としても使われている。
Jawbone (米国)	UP	リストバンド型	2012年11月	歩数、移動距離、休憩/活動時間と消費カロリー及び睡眠サイクルを記録し、スマートフォン等と同期・管理ができるリストバンド型活動量計。睡眠の浅いときに快適な起床を促す「スマートアラーム」、バーコードによる食事記録の読取等の機能もある。
ソニー (日本)	SmartBand SWR10	リストバンド型	2014年5月発売 (日本)	電子ペーパーだけでなく、ユーザーの移動状況、撮影した写真、聴いた音楽、スマートフォンでのコミュニケーションの状況等の活動を記録して「日記」にできる。
Pebble Technology (米国)	Pebble	腕時計型	2012年	電子ペーパーによる視認性に優れた表示板、防水性の筐体、従来の腕時計に近いデザイン等が特徴。iOS及びAndroidスマートフォンとBluetoothによりワイヤレスでつながり、電話受信、メール受信、SNS等の連動表示をする。オープンプラットフォームとしてSDKを公開しており、約1,300のアプリケーションが開発されている。
VUZIX (米国)	M100 スマートグラス	メガネ型	2013年	3次元センサー、カメラ、無線LAN、Bluetoothと一通りの機能を搭載している。Android OSを搭載し、単体での利用と、スマートフォンと連携しての利用の両方が可能。
ウェストユニテス (日本)	inforod	メガネ型	2014年4月発表	片眼式のメガネ型ウェアラブル端末。本体重量48gと世界最軽量級で、世界最小のディスプレイを搭載。
Oculus VR (米国)	Oculus Rift	HMD型	2012年 (一般向けは未発売)	VRに特化したHMD端末。視野角が110度と広いゴーグル型の端末であり、装着しているユーザーの頭の動きに画面が反応する。広視野角のため没入感が大きく感じられ、各種ゲーム等の利用に特化した製品である。 一般向け製品は未発売であるが、ソフトウェア開発に開心的な開発者向けには「開発キット」として350ドルで販売しており、これまでに7万5千台以上の注文を受け付けている (2014年3月に米Facebookが同社を20億ドルで買収する計画を発表)
セイコーエプソン (日本)	MOVERIO BT-200	HMD型	2014年1月発表	背景が透過するメガネに映像を投射するという独自のヘッドマウントディスプレイ。ブルーレイ/DVDレコーダーなどHDMI出力端子を搭載した機器と接続可能なモデルを設定したほか、スマートフォンやタブレット内のコンテンツをMiracast接続で大画面視聴できる機能を備え、パーソナルシアターとして様々な映像コンテンツを楽しむことができる。また、Wi-Fi接続により単体でWebブラウジングやネット動画などを楽め、各種センサー (カメラ、ジャイロ、加速度、地磁気)、GPS機能を搭載している。
GoPro (米国)	HERO2 HERO3	カメラ型	HERO2は2011年10月発売 HERO3は2012年11月発売	小型・軽量で防水・防塵・耐衝撃性があり、アウトドアスポーツ時等に身体に装着して動画撮影ができる「アクションカメラ」の先行商品。Wi-Fi経由でスマートフォンからの操作、撮影画面の確認、撮影画像のSNSへのアップ等ができる。様々なアクセサリがあり、頭部、腕、胸部に装着したり、ヘルメット、自転車・バイク、サーフボード等に付けて撮影ができる。4K画像に対応しているモデルもある。
ソニー (日本)	AS15 AS30V	カメラ型	AS15は2012年10月発売 AS30Vは2013年10月発売	Wi-Fi経由でスマートフォンからの操作や確認等が可能なアウトドアスポーツ等での利用を前提とした小型・軽量のビデオカメラ。AS30Vは腕時計型の「ライブビューリモコン」からも操作ができる。
パナソニック (日本)	HX-A100	カメラ型	2013年5月発売	カメラ部と本体が分離しているのが特徴のウェアラブルカメラ。カメラ部は約30gと小型・軽量であり、付属品のイヤーフックにより耳の付近に装着することもできる。
Misfit Wearables (米国)	Misfit SHINE	コイン型	2012年11月	コイン型の活動量計センサー。装着具により身体の様々な場所に付けられ、50m防水で水泳時等にも使える。

※ HMDはヘッドマウントディスプレイ型

図 1-1 ウェラブル端末例 (出典：総務省平成 26 年版情報通信白書)



図 1-2 次世代エレクトロデバイス例 (出典：独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構、次世代プリンテッドエレクトロニクス材料・プロセス基盤技術開発)



図 1-3 情報通信機器の機構精度の動向



図 1-4 精密位置決め機構の必要性



図 1-5 液滴塗布装置の開発動向

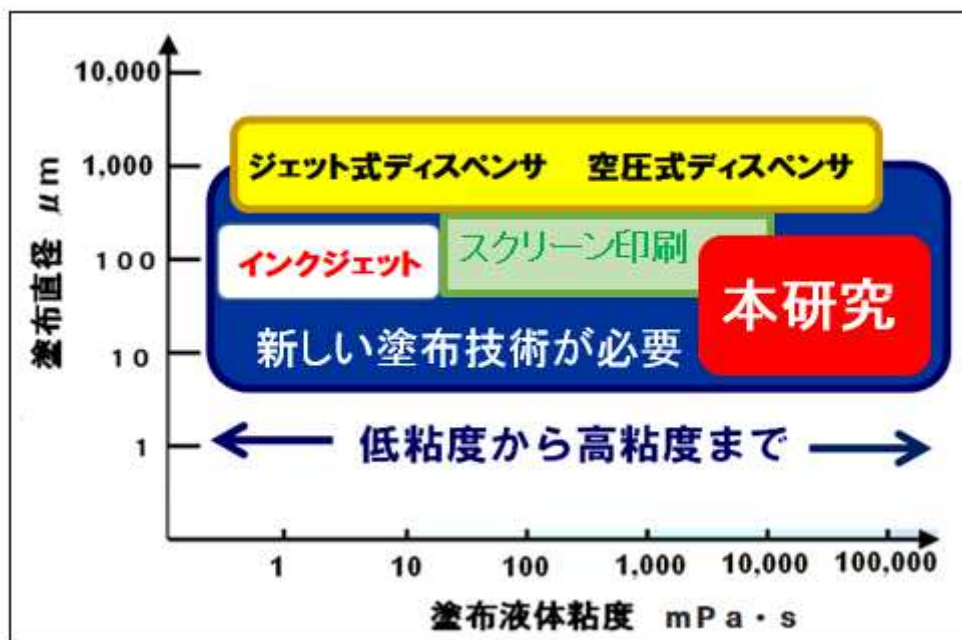


図 1-6 液滴塗布装置の開発動向

1.2 小型で精密な位置決め機構

小型で精密な位置決め機構に用いられるアクチュエータの代表的なものとして、圧電素子（図 1-7）やソレノイド（電磁弁）（図 1-8）、シリンダー（油圧・空圧）（図 1-9）等がある。圧電素子は電歪素子であり、誘電体に電界を加えることで電気分極を起こし、その結果、結晶格子に変位が生じ、機械的に歪む性質を持つ。ソレノイドやシリンダーは、微細制御性・応答性において、その限界に近く、圧電素子のほうが、より高精度・高速なアクチュエータといえ、小型・軽量化が図れる。図 1-7 のように積層された構造をもつ圧電素子は、高分解能、大発生力、高速応答、電気機械変換効率が低いという特徴を有する。このため、本論文では圧電素子に着目している。

圧電素子を用いた位置決め機構の駆動方法には、静的駆動（図 1-10）や、励振駆動（図 1-11）、インパクト駆動（図 1-12）などがある。

静的駆動は、圧電素子を移動体に接続し、その変位量をそのまま駆動に用いたものである[1-2]。光学系のミラー・レンズ位置調整（図 1-13）や半導体製造・検査装置のウエハの位置決め、加工機のバイトの送り等に応用されている。特徴として、高分解能、大発生力、機械的な摩擦がないことなどがある。静的駆動では、圧電素子の変位量が小さいために、この変位量を超える場合には、弾性変形を利用した案内機構や変位拡大機構を使用することが一般的である。または、動作領域を粗動領域と微動領域に分け、粗動領域を別のモータなどに、微動領域を圧電素子に駆動させるような使い方をすることが多い。変位拡大機構では、ヒンジ構造やばねのような変形を利用したものが代表的であるが、圧電素子の小型・軽量という特徴を損なうことになる。

次に励振駆動は、圧電素子により振動体（ステータ）に超音波振動を発生させ、摩擦力を介して移動体（スライダ）を駆動するものである[1-3]。顕微鏡の試料ステージ（図 1-14）や MRI の姿勢制御、部品搬送装置等に応用されている。励振駆動の主な特徴は電磁モータと比べ、低速で高トルクであり、起動や停止の応答性が良く、停止時に保持トルクを有し、さらに静粛性や磁気ノイズの発生がないことなどである。しかし、振動や摩擦による磨耗が激しいという欠点がある。

圧電インパクト駆動は、圧電素子の急速変形に伴う慣性力を利用して微小移動を起こす駆動方式である[1-4]。移動体と慣性体を圧電素子で結合し、移動体と移動面の間の摩擦力によって、静止状態を保持する機構である。ワークの芯出し（図 1-15）やカメラのレンズ駆動、精密インジェクタに応用されている。その特徴は、簡単な構造で小型であり、高精度な位置決めができ、無限の稼動範囲を有することである。

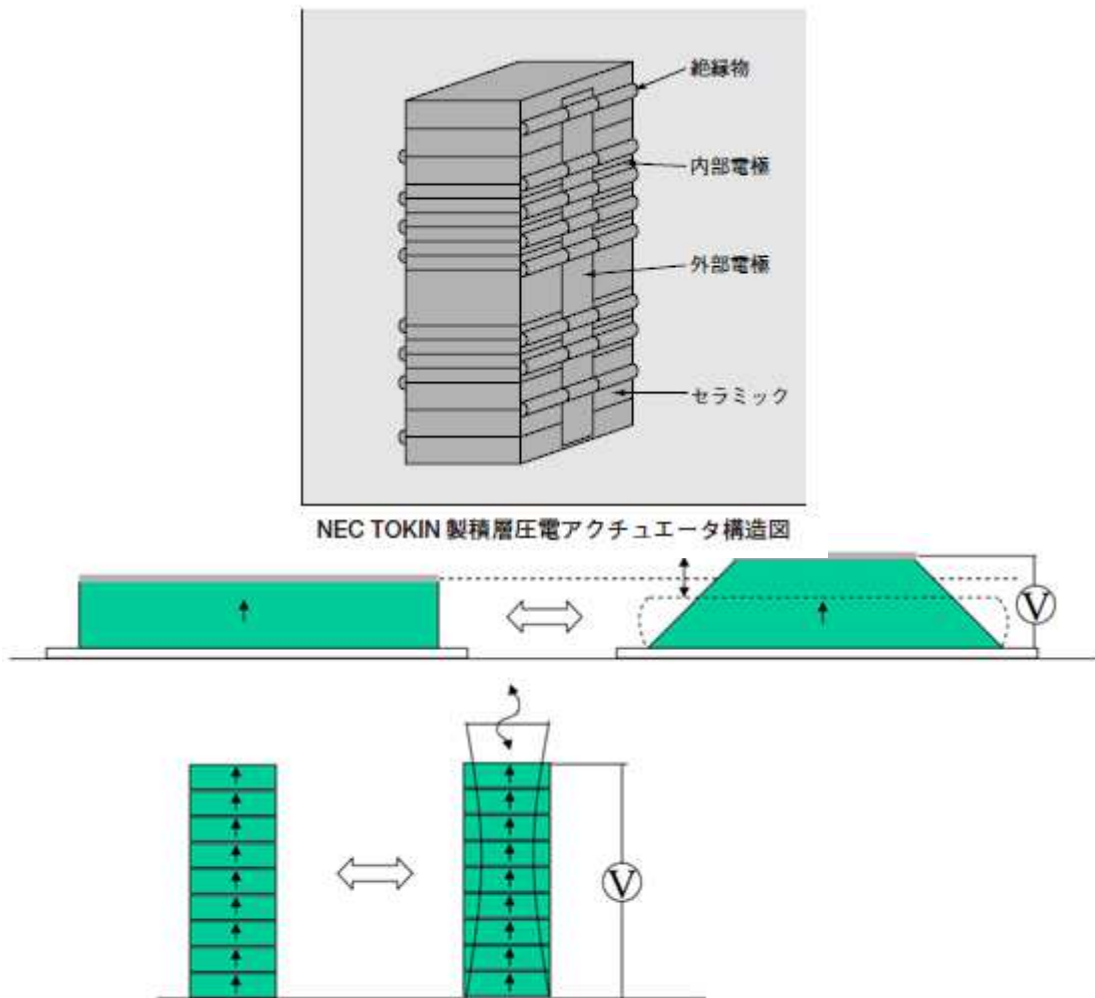


図 1-7 圧電素子の構造と変形の様子（出典：NEC トーキン株式会社）

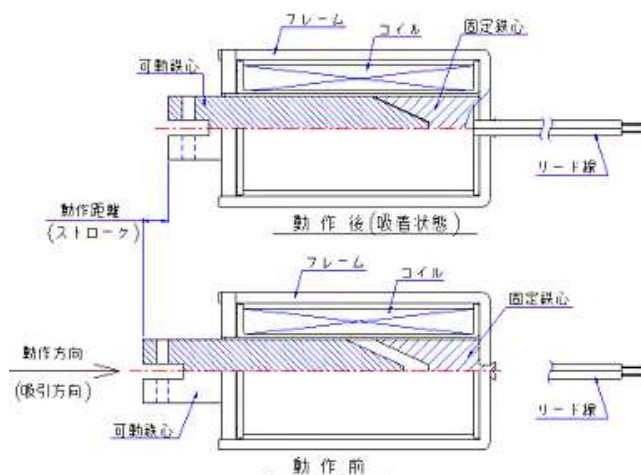


図 1-8 ソレノイドの構成（出典：ケーシーエス株式会社）

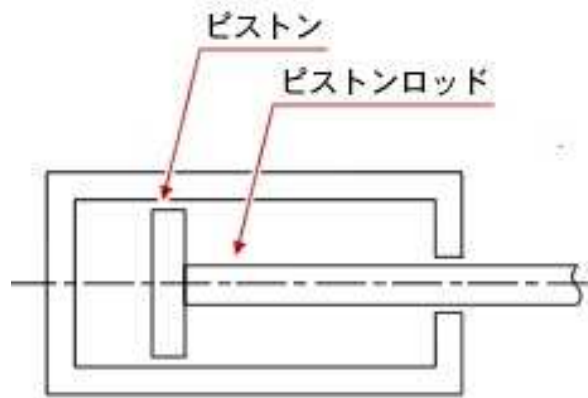


図 1-9 エアシリンダの構成（出典：株式会社ミスミ）

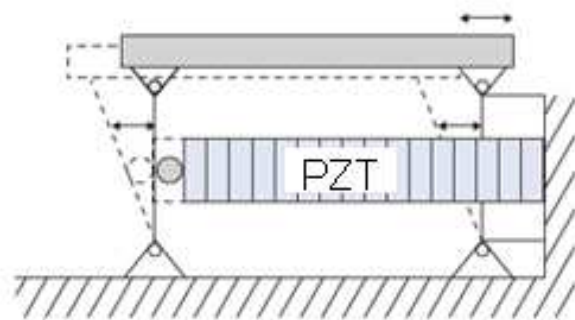


図 1-10 静的駆動(出典：ピーアイ・ジャパン株式会社)

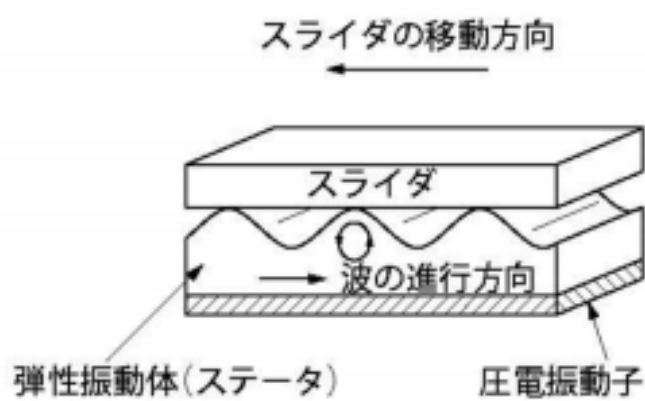


図 1-11 励振駆動（出典：FDK 株式会社）

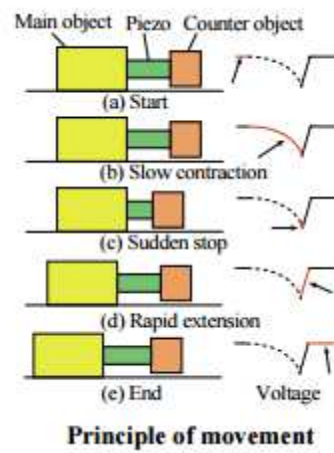


図 1-12 インパクト駆動（出典：豊田工業大学）

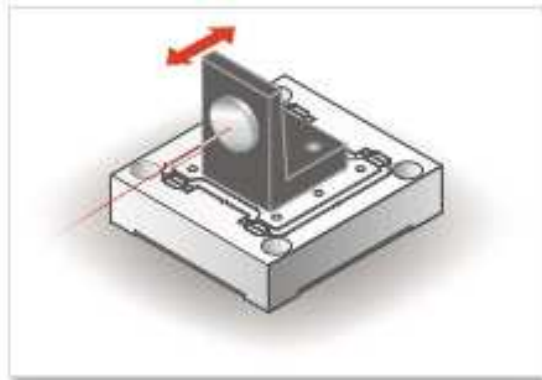


図 1-13 光学系の調整用ピエゾステージ（静的駆動）（出典：株式会社ナノコントロール）



図 1-14 顕微鏡用ピエゾステージ（励振駆動）（出典：株式会社ナノコントロール）

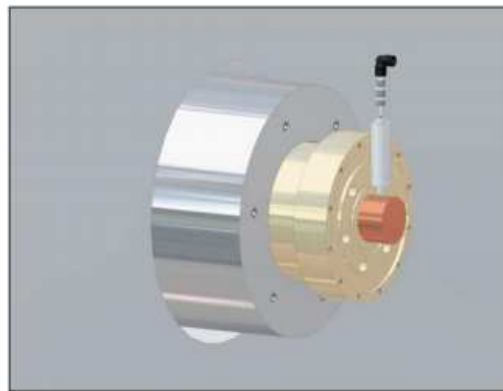


図 1-15 ワーク芯出し機構（圧電インパクト駆動）（出典：株式会社ナノコントロール）

1.3 新たな製造装置の必要性と要求仕様

実際のエレクトロデバイスとしてスマートフォンを例に挙げると、その製造工程において、組立や液滴（導電性材料や接着剤等）塗布の要求精度は非常に高まっている。スマートフォンでは、本体の厚さを薄くするためにタッチパネル基板はフレキシブル基板が用いられている（図 1-12）。フレキシブル基板上に配線パターンをスクリーン印刷技術で作成している（図 1-13）[1-5]。スクリーン印刷技術では、低粘度（50mPas 以下）の導電性インクを利用しているために、線幅は広がり、50 μ m のラインアンドスペース（L&S）が限界である。次世代のスマートフォンでは 50 μ m 以下の L&S が要求されている。配線パターンの断線部分にはリペア（修復塗布）を施す必要がある。リペアを行う際には断線部分を検出する必要があり、画像方式やレーザ方式等の検査装置と組み合わせなくてはならない。しかしスクリーン印刷装置は大型であるため、そのような検査装置と組み合わせることができない。そこで現状では、別工程として導通検査装置を用いて導通不良の有無を調べる。不良基板はさらに別工程へ進み、顕微鏡観察され不良個所の位置を特定される。その後、別のリペア装置によりリペアされる。またこの基板を他の基板上に積層して接着固定する際には、線幅（50 μ m）以下の位置決め精度、直径 100 μ m（金属接点部）以下の接着剤塗布が必要となる。

またスマートフォンのカメラレンズユニット（図 1-14）でも、レンズの位置決め（機械加工精度を利用して 50 μ m 以下）や接着剤塗布（ディスペンサーを用いて直径 100 μ m）が必要で、手作業による組み立ては困難を極めている。

このような問題に対して、専用の製造装置も開発されているが、装置価格が高いことや操作・メンテナンスが難しいことで新興国での使用には不向きである。

そこでこのような精密組立作業で望まれる位置決め機構や液滴塗布機構の要求仕様は次の通りであり、この仕様の製造装置開発を実現させなくてはならない。

小型で汎用性が高い（周辺装置へ組み込み可能）

高精度位置決め（位置決め分解能 1 μ m 以下）

広い可動範囲（mm オーダ）

液滴塗布直径、体積、粘度（50 μ m 以下、pL オーダ、5000mPas 以上高粘度）

誰にでも簡単に扱える操作・メンテナンス性（新興国で使用可能）

低コスト（装置の低価格化、低稼働費）

上述した圧電インパクト駆動は、簡単な構造で小型化でき、無限の可動範囲を持ちながら高分解能な位置決め精度を有しており、上記仕様の製造装置開発に適していると考えられる。

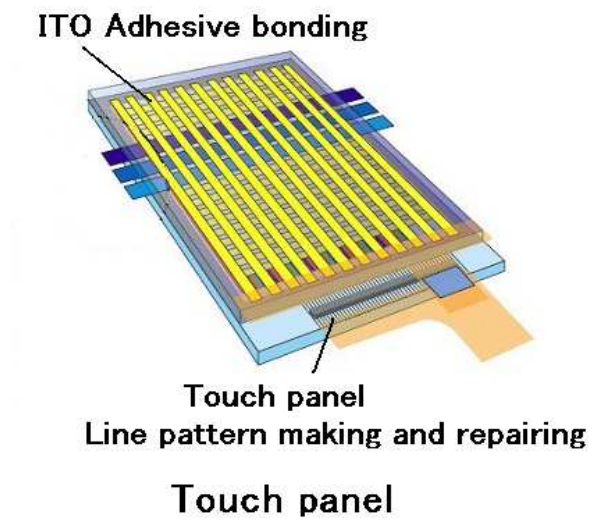


図 1-12 スマートフォン（タッチパネル）（出典：ソニー株式会社）

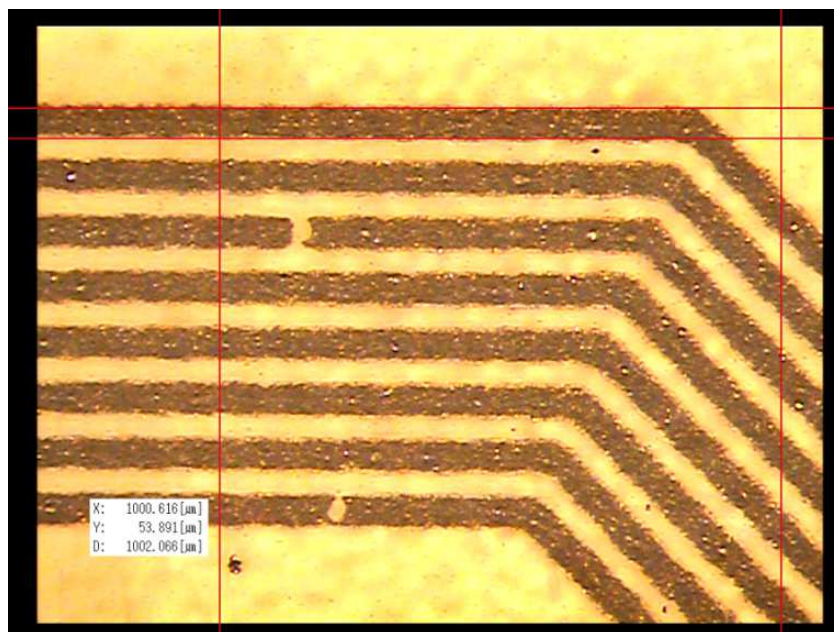


図 1-13 タッチパネル配線パターン（断線あり）（出典：株式会社桜井グラフィックシステムズ）



図 1-14 カメラレンズユニット（出典：武蔵エンジニアリング株式会社）

1.4 研究目的

精密組立作業では精密な部品の位置決めや微量の液滴塗布の必要がある。しかし、既存技術を組み合わせて装置化すれば、機構の剛性・精度、操作性、汎用性の低下に繋がるために、新たに小型で高精度な汎用性の高い製造装置が求められている。

そこで本研究では、圧電インパクト駆動を用いた超精密XYステージと微小液滴塗布機構を提案する。これにより、組立部品の精密位置決めと微量の液滴塗布が可能となり、次世代のエレクトロデバイス製造が可能になると考えられる。

1.5 論文の構成

本論文は5章で構成する。概要は以下の通りである。

第1章「緒論」では、デバイスの小型化に伴う超精密組立作業の重要性について論じている。超精密組立作業では、微小物体を所定の位置へ精密に移動させたり、接着材を微量塗布する際に精密位置決め機構や液体の塗布機構が必要となっている。精密な機構に用いられるアクチュエータとして圧電素子があり、静的駆動や共振駆動、インパクト駆動などが知られている。その中で特に圧電インパクト駆動は高分解能な位置決めと無制限の稼動範囲が得られるため応用範囲が広く、構造が簡単のため小型化に適している。まずここでは従来の圧電インパクト駆動方法を概観し、それぞれの特長や超精密位置決め機構の実用化例などについて論じている。次に超精密位置決め機構を用いた微小部品の把持や組み付け作業について概観し、位置決め作動ストロークや操作性、装置寸法などの問題点を指摘して、可動範囲の増加、操作性向上、装置の小型化の機能が要求されていることを述べている。

第2章「圧電インパクト駆動による Blu-ray Disc 用ピックアップレンズの調芯機構」では、最初に圧電インパクト駆動による超精密位置決め動作原理について説明している。圧電素子の駆動電圧波形に、のこぎり波形を用いた場合の駆動周波数と移動体の移動量の関係について示している。この方式を Blu-ray Disc 用ピックアップレンズの調芯機構に適用し、開発した圧電インパクト駆動式 V 溝 XY ステージについて説明している。V 溝 XY ステージの位置決め性能について計測結果を示し、X、Y ステージそれぞれの最小位置決め分解能を明らかにしている。レンズ把持部を V 溝 XY ステージ上に搭載し、レンズ調芯用の V 溝 XY ステージ機構を構成している。レンズ把持部搭載後の V 溝 XY ステージの位置決め性能、把持によるレンズの傾きについて実験評価し、位置決め分解能 85nm、レンズ傾斜角度 0.01 度以下の良好な結果を得た。レーザ干渉計（青色、波長 405nm）を用いて干渉縞を観察しながら XY ステージを駆動させて実際にレンズ調芯を行い、偏芯のない位置決め成功していることを述べている。

第3章「ニードル式液滴塗布装置とニードル先端接触検知法」では、まずニードル式液滴塗布装置の液滴塗布原理について述べている。塗布液体はピペット内に充填されており、こ

の中をニードルが貫通し、ニードル先端部に付着した液体が塗布基板上へ転写されて塗布が行われる。ここでは液体粘度、ニードル直径、ニードル先端と塗布対象面との間隔などに関して、塗布量との関係を実験的に求めている。この際、ニードルが塗布基板に衝突すればニードルおよび塗布基板の損傷となる。ニードル先端部を塗布基板に接触させることなく、塗布を行う必要がある。そこでニードル先端部に付着した液体の塗布基板上への接触検知方法に着目し、オンマシンで接触検知する方法を提案している。ここではニードルを機械共振機構で微小振動させ、先端部の液滴が対象物に接触した瞬間に機械共振点が変化することを利用して、接触検知を行っている。ニードル直径、液体粘度、塗布基板を変化させて、ニードル先端液滴の塗布基板への接触検知実験を行っている。ニードル直径 $100\mu\text{m}$ を用いてシリコンオイル粘度 $100\sim 100,000\text{mPas}$ の高粘度液体を用いて実験を行い、接触時に共振周波数や振幅の変化から、ニードル先端部の液滴が塗布基板への接触した瞬間の検知に成功している。またニードル振動を用いた塗布により、塗布した液滴の直径ばらつきを低減することができたことを記している。

第4章「圧電インパクト駆動による微小液滴塗布機構」では、微小液滴塗布機構に用いる圧電インパクト駆動の動作原理について述べている。まず圧電素子に印加する駆動電圧波形に着目し、先端突起付き矩形波を提案し、従来ののこぎり波形との特性の相違について比較し、得られる加速度成分について説明している。得られた加速度から移動体の締め付け力を決定し、圧電インパクト駆動式微小液滴塗布機構を試作している。試作機に先端突起付き矩形波を入力し、移動性能評価実験を行い、 $1\mu\text{m}$ の位置決め分解能が得られている。さらに圧電インパクト駆動されるV溝XYステージと組み合わせて微小液滴塗布装置を構成した。ニードル直径と液体粘度を変化させて、塗布実験を行っている。本試作機を用いて高粘度導電ペースト ($50,000\text{mPas}$) を直径 $12\mu\text{m}$ で塗布することに成功しており、このことにより低抵抗パターン等で重要視されている高粘度液体の微量塗布が実現し、その実用化が期待できる。また圧電インパクト駆動式微小液滴塗布機構は小型であるため、複数台配置することで高効率な塗布が実現できることが期待される。

第5章「結論と今後の課題」では、本論文をまとめるとともに今後の課題について論じている。

緒論では本研究の背景や関連研究を概観するとともに従来の精密位置決め機構の問題点を指摘し、可動範囲の増加、操作性向上、装置の小型化の機能が要求されていることを述べている。次に微量の液滴塗布技術について、超精密位置決め機構と極細ニードルを用いて液滴を転写する方法について説明し、ニードル先端と塗布面との接触検知の重要性を述べて、既存の接触検知手法について紹介している。また、ニードル式液滴塗布機構では、ニードル駆動ストロークの増加、高分解能位置決め、小型化が要求されていることから、ニードル駆動に圧電インパクト駆動方式を適用することでこれらの要求を満たすことができると考えた。

圧電インパクト駆動によるBlu-ray Disc用ピックアップレンズの調芯機構では、最初に圧電インパクト駆動による超精密位置決めの動作原理について説明している。圧電素子の駆動電圧波形に、のこぎり波形を用いた場合の駆動周波数と移動体の移動量の関係について示し、

圧電インパクト駆動式 V 溝 XY ステージを試作した。レンズ把持部を V 溝 XY ステージ上に搭載し、レンズ調芯用の V 溝 XY ステージ機構を構成した。V 溝 XY ステージ機構は、位置決め分解能 85nm、レンズ傾斜角度 0.01 度以下の良好な結果を得た。レーザ干渉計（青色、波長 405nm）を用いて干渉縞を観察しながら XY ステージを駆動させて実際にレンズ調芯を行い、偏芯のない位置決め成功した。

ニードル式液滴塗布装置のニードル先端位置計測では、ニードル式液滴塗布装置の液滴塗布原理について述べ、ニードル先端部に付着した液体の塗布基板上への接触検知方法を提案した。ニードルを機械共振機構で微小振動させ、先端部の液滴が対象物に接触した瞬間に機械共振点が変わることを利用して、接触検知することができた。ニードル直径 100 μ m を用いてシリコンオイル粘度 100～100,000mPas の高粘度液体を用いて実験を行い、接触時に共振周波数や振幅の変化から、ニードル先端部の液滴が塗布基板への接触した瞬間の検知に成功している。またニードル振動を用いた塗布により、塗布した液滴の直径ばらつきを低減することができた。

圧電インパクト駆動による微小液滴塗布機構では圧電素子の駆動電圧波形について、のこぎり波と先端突起付き矩形波を加速度に着目して比較考察を述べている。試作した 2 つの機構について、位置決め性能を明らかにし、実用性について検討している。応用実験では圧電インパクト駆動方式で極細ニードルを高粘度導電性ペースト（50,000mPas）の充填されたピペット内に貫通させて、極微量（直径 12 μ m）の液体の塗布に成功した。

今後の課題として、圧電インパクト駆動式ニードルの位置決め機構に共振検知機能を付加し、ニードル先端の液滴と対象面と接触状況を計測できるようにし、ニードル位置の閉ループ制御を実施すれば、さらに高い再現性の高粘度微小液滴塗布が可能になることを示唆している。

第2章 圧電インパクト駆動による Blu-ray Disc 用ピックアップレンズの調芯機構

2.1 はじめに

デバイスの小型化に伴い、手作業での部品組立が困難になり、様々な部品の位置決め装置が必要となっている。特にデータを書き込むための記憶媒体では、CD から DVD、Blu-ray へと変わり、使用波長が短くなるにつれ光学系には高精度の位置決めが要求される。本研究は高精度レンズメーカーであるナルックス株式会社との共同研究開発であり、Blu-ray Disc 用ピックアップレンズの光学性能を確保するための調芯作業において、高精度な位置決め機構が必要とされ、また製品価格を下げるために汎用性が高く、安価で簡便な操作が可能な調芯装置を開発するものである。従来の CD、DVD Disc 用ピックアップレンズの調芯作業では、一般的なレンズ調芯方法であるレンズを落とし込んで位置決めするバレル方式（図 2-1）が主流であった[2-1]。この方法では、レンズ外径寸法とバレル内径寸法の公差、およびレンズ厚さ寸法とカラー厚さ寸法の公差を厳しく管理することでレンズの中心を簡単に位置決めすることができる。しかし Blu-ray Disc 用ピックアップレンズの調芯作業では、使用波長が短くなったために、レンズ調芯に要求される精度（XY:±100nm、傾き:0.01 度以内）が非常に高くなり、部品の加工精度限界に達したためバレル方式は適用不可能となった。バレル方式以外の既存のレンズ調芯には、マイクロメータヘッドを用いる方式（図 2-2）やフレーム付きレンズ方式（図 2-3）等もあるが、マイクロメータヘッドでは位置決め精度が 100nm 以上であるために Blu-ray Disc 用では位置決め精度不足である。またフレーム付きレンズ方式はレンズ位置決め後にフレームをレンズから切り離す作業が必要であり、このときに位置決め精度が悪化することと、簡便な方法ではないという問題がある。Blu-ray Disc 用に位置決め精度を高めたレンズ調芯方法には、圧電素子の静的駆動ステージを用いた装置（図 2-4）や圧電インパクト駆動を用いた装置（図 2-5）などがある。圧電素子の静的駆動ステージを用いた装置は、既に観察系が組み込まれているために汎用性が低く、またレンズ外形寸法位置を画像から計測する方法による位置決めのために精度が低い。図 2-5 の圧電インパクト駆動を用いた装置は、レンズに対して 4 点支持であるために支持状態が不安定になり、レンズ初期位置への配置操作が難しい、また装置が大型で干渉計の直下に配置できないという問題がある。これらの点を考慮し、高精度な位置決め（XY:100nm、傾き: 0.01 度以内）が可能で、操作性が良く簡便な方法で汎用性の高い調芯装置を開発する必要がある。そこで圧電インパクト駆動を用いたレンズ調芯機構を提案する。圧電インパクト駆動は高分解能な位置決めと無制限の稼動範囲が得られるため応用範囲が広く、構造が簡単で小型化に適しているためレンズ調芯機構に適していると考えられる。

最初に圧電インパクト駆動による超精密位置決めの動作原理について説明する。圧電素子の駆動電圧波形に、のこぎり波形を用いた場合の駆動周波数と移動体の移動量の関係について示す。

次に Blu-ray Disc 用ピックアップレンズの調芯機構の仕様について述べる。レンズ調芯方

法としてレーザ干渉計による偏芯測定について説明し、レンズの調芯機構の概略を示す。そして試作した圧電インパクト駆動式 V 溝 XY ステージについて説明する。V 溝 XY ステージの位置決め性能について計測結果を示し、X、Y ステージそれぞれの最小位置決め分解能を明らかにする。レンズ把持部を V 溝 XY ステージ上に搭載し、レンズ調芯用の V 溝 XY ステージ機構を構成する。レンズ把持部搭載後の V 溝 XY ステージの位置決め性能、把持によるレンズの傾きについて実験評価し、位置決め分解能 85nm、レンズ傾斜角度 0.01 度以下の良好な結果を得た。レーザ干渉計（青色、波長 405nm）を用いて干渉縞を観察しながら XY ステージを駆動させて実際にレンズ調芯を行い、偏芯のない位置決め成功していることを述べ、有用性を示す。

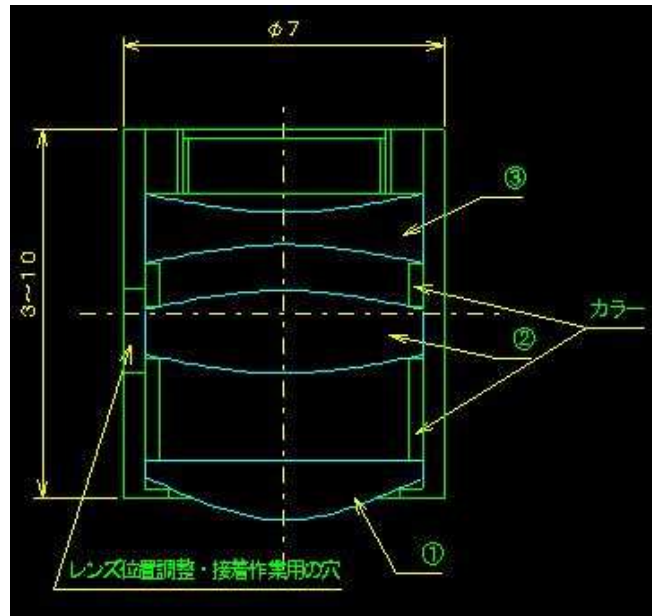


図 2-1 同軸バレル（スリーブ）構造例（①②③はレンズ）

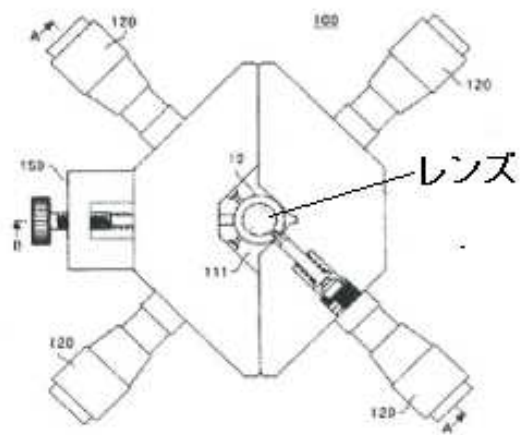


図 2-2 マイクロメータヘッドを用いた調芯（出典：リコーイメージング株式会社）

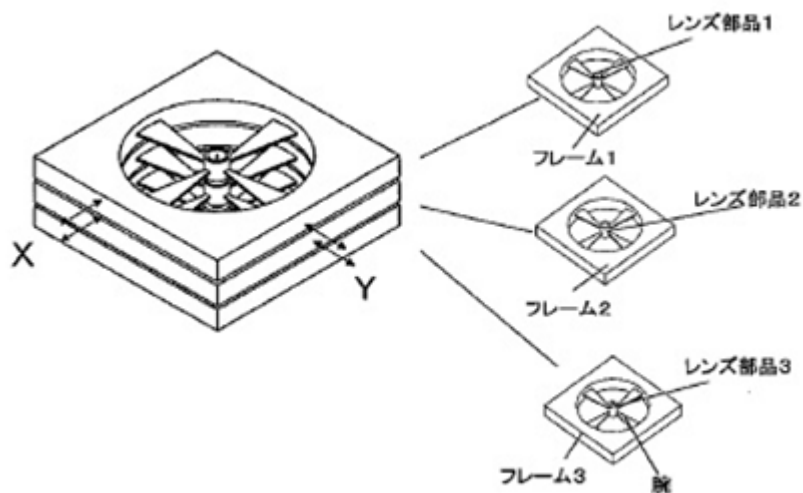
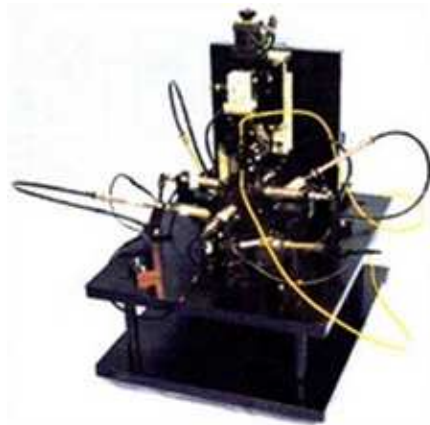


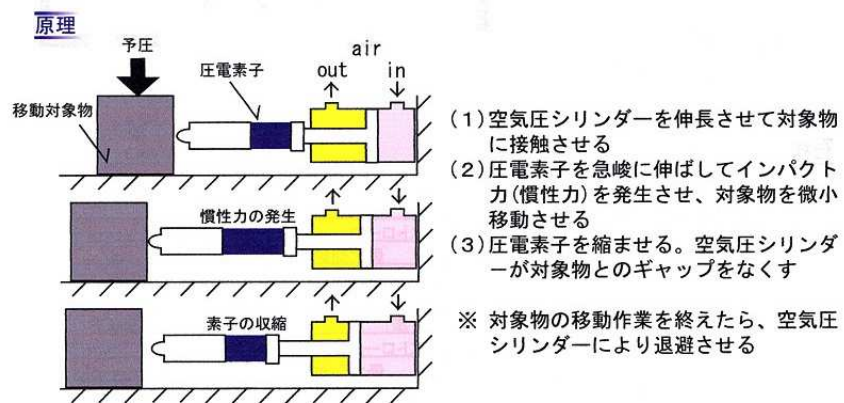
図 2-3 フレームを用いた調芯（出典：ナルックス株式会社）



図 2-4 観察系付き調芯装置 TRIOPTICS 社製自動光軸調芯接合装置



(a) 装置構成



(b) 駆動原理

図 2-5 圧電インパクトによる調芯装置例 (出典：株式会社ナノコントロール)

2.2 圧電インパクト駆動の動作原理

圧電インパクト駆動機構は圧電素子の急速変形を利用して圧電素子と接続された移動体を摩擦力で微動させる方法であり、樋口らの研究グループにより多く研究が報告されている[2-2,3]。精密な移動機構として知られており[2-4]、摩擦力を利用した駆動方式である[2-5,6]。圧電インパクト駆動機構の構成方法によって、傾斜動作などにも利用でき、傾斜分解能 0.001 度で電子顕微鏡内で使用することもできる[2-7,8,9]。またロボットアームの動作やレンズのオートフォーカス動作などにも利用されている[2-10,11,12]。圧電インパクト駆動機構は圧電素子の両端に移動体とおもりを接続させた単純な構造であるため試作も容易である。これまでこれらの移動機構について試作して実験データに基づいて移動の現象を説明したものはあったが、圧電素子の時間的な変位量及び加速度に着目した移動原理の理論的な解析はなされていない。そこで圧電インパクト駆動機構の移動原理を理論的に解析し、実験により確認する。

圧電インパクト駆動による移動体の動作原理を図 2-6 に示す。(1)は初期状態である。移動体 M は、圧電素子に接続されており、圧電素子の反対側にはおもり m が接続されている。移動体は摩擦のある平面状に設置・保持されており、移動面との摩擦係数は μ とする。(2)の時、圧電素子にゆっくりと電圧を印加すると圧電素子がゆっくりと伸びる。この時、移動体 M は摩擦力により保持されており移動しない。(3)の時、圧電素子に急速に電圧を印加すると圧電素子が急速に縮む。この時、移動体 M に発生する慣性力が摩擦力を超え、移動体 M は移動する。図 2-6 (1) ～ (3) の動作を繰り返すことで移動体 M は微少ステップ移動し、圧電素子の伸びと縮みを逆転することで、逆方向へ移動する。

M	: 移動体質量 [g]
m	: おもりの質量 [g]
δ	: 圧電素子の変位 [μm]
x	: 移動体の変位 [μm]
δ_{max}	: 圧電素子の最大変位 [μm]
μ	: 摩擦係数
μ_0	: 最大静止摩擦係数
μ_1	: 動摩擦係数
g	: 重力加速度 [m/s^2]

2.2.1 緩慢動作時

図 2-6 (2) のように圧電素子をゆっくり伸ばす時の移動体の運動方程式を (2-1) 式に示す。移動体とおもりの移動方向についての座標系は図中に示す通りとする。

$$M \frac{d^2 x}{dt^2} = m \frac{d^2 \delta}{dt^2} - \mu(M + m)g \quad (2-1)$$

圧電素子に (2-2) 式のような変位 δ を与えると、速度、加速度は (2-3) 、 (2-4) 式及び図 2-7 のように求められる。

$$\delta = \frac{1}{2}ct^2 \quad (2-2)$$

$$\frac{d\delta}{dt} = ct \quad (2-3)$$

$$\frac{d^2\delta}{dt^2} = c \quad (2-4)$$

時刻 T_a の時、圧電素子の変位を最大変位 δ_{\max} とすると、(2-5) 式のようになる。

$$\delta_{\max} = \frac{1}{2}cT_a^2 \quad (2-5)$$

$$c = \frac{2\delta_{\max}}{T_a^2} \quad (2-6)$$

時刻 T_a の時、これらを代入すると運動方程式 (2-1) 式は次式となる。

$$M \frac{d^2x}{dt^2} = 2m \frac{\delta_{\max}}{T_a^2} - \mu(M+m)g \quad (2-7)$$

時刻 0 から T_a の間、移動体が静止摩擦力によって保持され移動しない。移動体が移動しない条件は以下のようになる。

$$\frac{d^2x}{dt^2} = 0 \quad (2-8)$$

$$2m \frac{\delta_{\max}}{T_a^2} - \mu_0(M+m)g \leq 0 \quad (2-9)$$

$$T_a^2 \geq \frac{2m\delta_{\max}}{\mu_0(M+m)g} \quad (2-10)$$

2.2.2 急速動作時

図 2-6 (3) のように圧電素子を急速に縮める時の移動体の運動方程式を (2-11) 式に示す。

$$M \frac{d^2x}{dt^2} = m \frac{d^2\delta}{dt^2} + \mu(M+m)g \quad (2-11)$$

圧電素子に (2-12) 式のような変位を与えると、速度、加速度は (2-13) 、 (2-14) 式及び図 2-8 のように求められる。

$$\delta = -k \frac{t^2}{2} + c_1 t + c_2 \quad (2-12)$$

$$\frac{d\delta}{dt} = -kt + c_1 \quad (2-13)$$

$$\frac{d^2\delta}{dt^2} = -k \quad (2-14)$$

時刻 0 の時、圧電素子は最大変位 δ_{\max} であるので、

$$\delta = \delta_{\max} \quad (2-15)$$

$$\frac{d\delta}{dt} = \frac{2\delta_{\max}}{T_a} \quad (2-16)$$

となり、以下の式が導かれる。

$$c_2 = \delta_{\max} \quad (2-17)$$

$$c_1 = \frac{2\delta_{\max}}{T_a} \quad (2-18)$$

これらを代入すると (2-12) 式は (2-19) 式となる。

$$\delta = -k \frac{t^2}{2} + \frac{2\delta_{\max}}{T_a} t + \delta_{\max} \quad (2-19)$$

移動体 **M** について、(2-14) 式を用いると運動方程式 (2-11) 式は (2-20) 式のように表せ、移動量 **x** は (2-22) 式のようになる。

$$M \frac{d^2x}{dt^2} = -mk + \mu(M + m)g \quad (2-20)$$

$$\frac{dx}{dt} = -\frac{m}{M} kt + \mu \left(1 + \frac{m}{M} \right) gt \quad (2-21)$$

$$x = -\left\{ \frac{m}{M} k \frac{t^2}{2} - \mu_1 \left(1 + \frac{m}{M} \right) g \frac{t^2}{2} \right\} \quad (2-22)$$

圧電素子の変位 δ が 0 となる時刻を T_s とし、 (2-12) 式に代入すると、 (2-23) 式のように表すことができ、 T_s は (2-24) 式のように求められる。

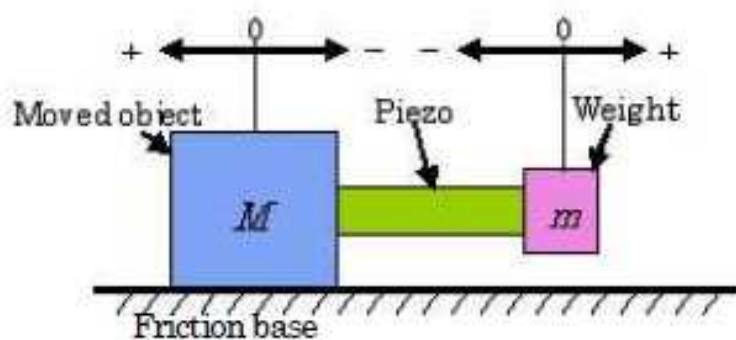
$$-k \frac{T_s^2}{2} + \frac{2\delta_{\max}}{T_a} T_s + \delta_{\max} = 0 \quad (2-23)$$

$$T_s = \frac{2\delta_{\max}}{kT_a} \pm \sqrt{\frac{4\delta_{\max}^2}{k^2 T_a^2} + \frac{2\delta_{\max}}{k}} \quad (2-24)$$

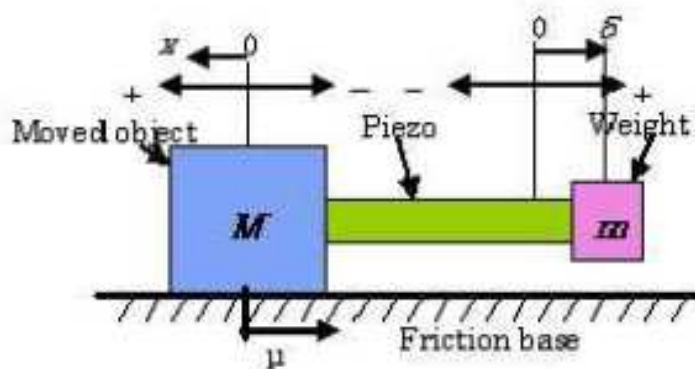
この T_s を (2-22) 式に代入することで移動体 M の移動量 x が求められる。

$$x = -\frac{T_s^2}{2} \left(\frac{mk}{M} - \mu_1 \left(1 + \frac{m}{M} \right) g \right) \quad (2-25)$$

(1) Start position



(2) Slow extension



(3) Rapid contraction

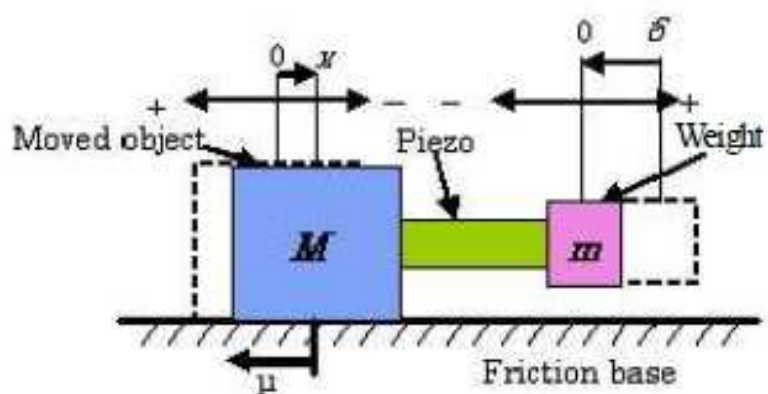


図 2-6 動作原理

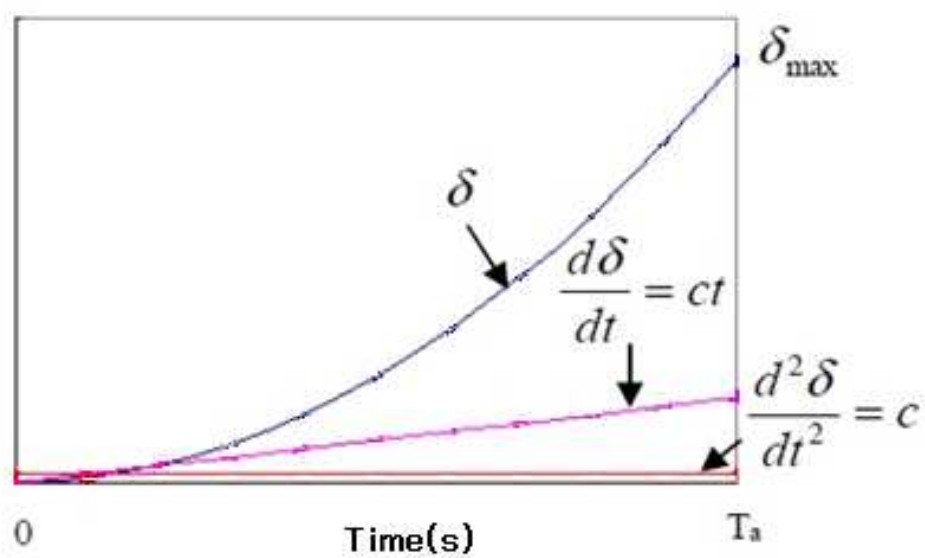


図 2-7 圧電素子の変位・速度・加速度の関係（ゆっくり伸ばす時）

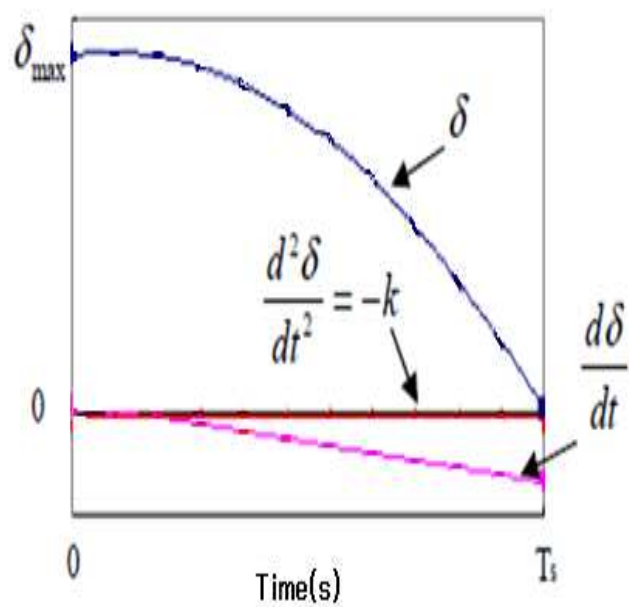


図 2-8 圧電素子の変位・速度・加速度の関係（急速に縮める時）

2.3 摩擦係数の測定

移動体の移動原理の解析に用いる摩擦係数として最大静止摩擦係数を利用することとし、図 2-9 に示すような底面にフッ素樹脂を付けた圧電インパクト駆動機構を、図 2-10 のようなガラスの斜面に配置して、摩擦角を計測することで最大静止摩擦係数を求める実験を行った。各記号の意味を次に示す。

- N : 垂直抗力 [N]
- M : 移動体質量 [g]
- g : 重力加速度 [m/s^2]
- μ_{\max} : 最大静止摩擦係数
- θ : 摩擦角 [$^\circ$]

図 2-10 のように水平と角度 θ をなす摩擦面に質量 M の移動体を置き、移動体が滑り始める角度、摩擦角を計測して以下の式に代入すると最大静止摩擦係数 μ_{\max} は 0.046 であった。後述の実験にはこの最大静止摩擦係数 μ_{\max} を摩擦係数 μ として利用した。

$$F = \mu_{\max} N \quad (2-26)$$

$$N = Mg \cos \theta \quad (2-27)$$

$$\mu_{\max} \leq \tan \theta \quad (2-28)$$

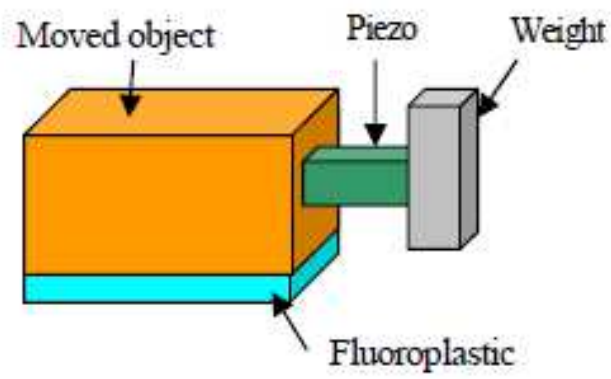


図 2-9 圧電インパクト駆動機構

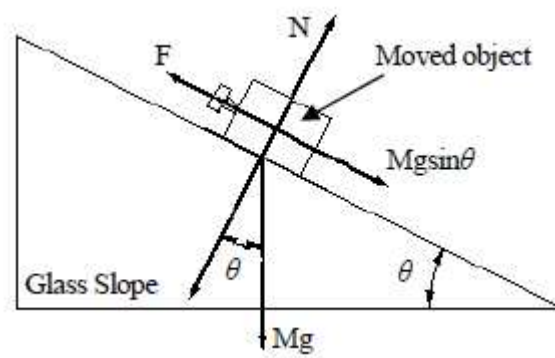


図 2-10 最大静止摩擦係数の計測

2.4 予備実験

2.4.1 実験条件

図 2-11 に実験システムの構成を示す。実験では制御用 PC を用いて圧電素子に印加する電圧波形の生成を行い、アンプにより増幅して移動体へ供給している。移動体には図 2-9 の圧電インパクト駆動機構を用い、ガラス板上に配置して実験を行った。移動体の変位は静電容量型変位計(ADE マイクロセンス 3050)を用いて測定した。静電容量型変位計の測定原理を図 2-12 に示す。静電容量型変位計は、測定対象物との距離が変化すると静電容量が変化するため、静電容量を測定することで距離を計測できる。圧電素子を駆動する条件には表 1 のパラメータ及び図 2-13 の駆動波形を用いた。

2.4.2 緩慢動作時の実験

圧電素子をゆっくり伸ばす時の移動体の移動量について、圧電素子への印加電圧を印加する時間 T_a を 0.8~2ms (1300~500Hz) まで変化させて実験した。

表 1 のパラメータを使用した場合に移動体が移動しない条件は (2-10) 式に表 1 の値を代入することで求められ、 $T_a \geq 1.1 \text{ ms}$ となる。実験結果を図 2-14 に示す。実験結果から移動体の移動量が 0 となったのは $T_a \geq 1.1 \text{ ms}$ (900Hz) の時で、計算値と一致した。

2.4.3 急速動作時の実験

圧電素子を急速に縮める時の移動体の移動量について、圧電素子への印加電圧を印加する時間 T_s を 0.1~0.3ms (10~3KHz) まで変化させて実験した。実験結果を図 2-15①に示す。

T_s が 0.3ms (3KHz) の時に圧電素子の変位が 0 となると仮定すると、図 2-8 の加速度 k は、 $T_a = 1.1 \text{ ms}$ として (2-24) 式に代入すると、 $k = 16.6$ と求められる。この k を用いて $T_s = 0.3\text{ms}$ の時の移動体の移動量を (2-25) 式より求めると、移動量 $x = -65 \text{ nm}$ となる。 $k = 16.6$ 一定とし、 T_s を 0.1~0.3ms (10~3KHz) まで変化させて移動体の移動量を (2-25) 式より計算し、 $x = -65 \text{ nm}$ をオフセットとして引くと、図 2-15②のようになる。圧電素子を急速に縮める時の移動体の移動量については、オーダー的にはほぼ計算値と実験値が一致した。 T_s が 0.16~0.3ms (6~3KHz) の部分では、 T_s が大きくなるほど移動体の移動量は減少している。計算値に比べて実測値がばらついているが、その理由には移動体と移動面であるガラス板の接触面の状態や、最大静止摩擦係数を摩擦係数として用いて移動量を計算していることといった不確実な部分があるためと考えられる。

$T_s < 0.16\text{ms}$ (6KHz) の部分では、計算値のような移動量の増加はなく、実測値では移動量は減少している。圧電素子は印加電圧を印加する時間が短くなると変形が小さくなることが知られている[2-13]。計算値では圧電素子の最大変位量を印加時間によらず一定として計算しているため、印加時間が短くなるほど移動体の移動量が増加しているが、実際には圧電素子への電圧の印加時間を短くするほど移動体の移動量が増えるとは限らず、最大移動量となる印加時間がある。

この予備実験の結果から、圧電インパクト駆動による移動体の移動量は式 (2-25) を用いることで概ねあらわすことができると考えられる。

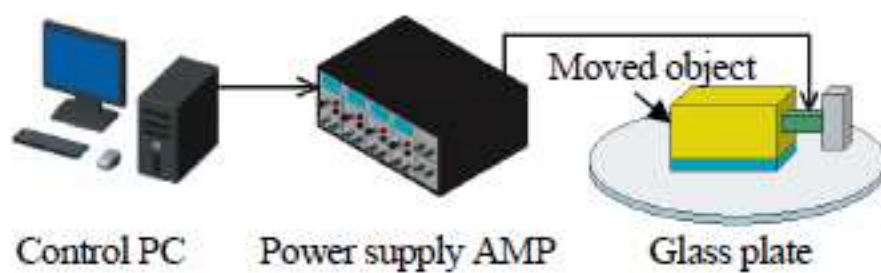


図 2-11 実験構成

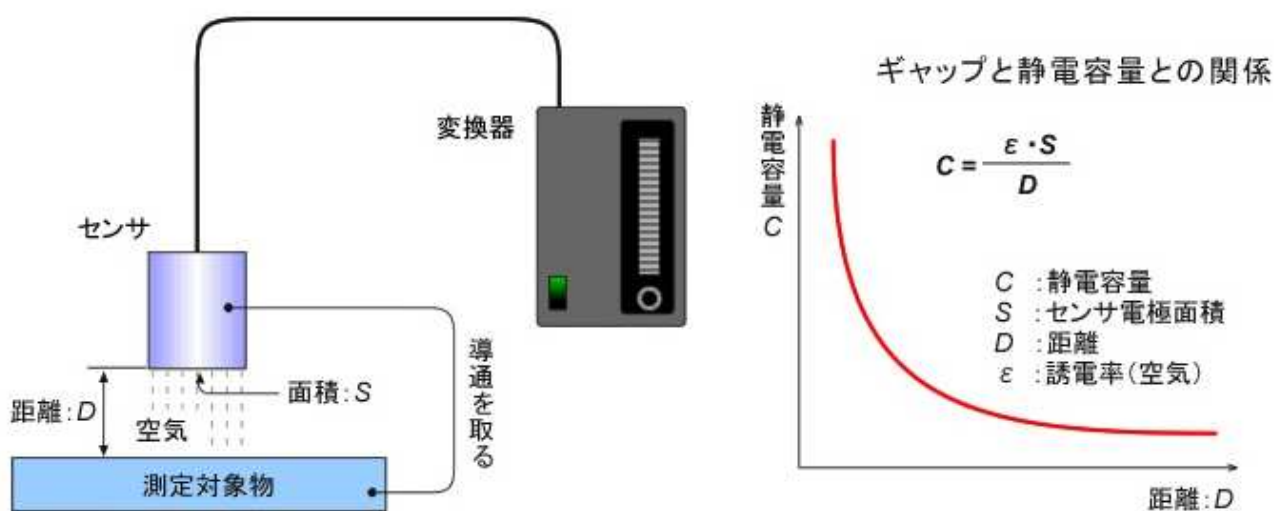


図 2-12 静電容量型変位計の測定原理

表 2-1 実験条件

Parameters	Value
V	60 V
δ_{max}	3 μm
μ	0.046
M	50 g
m	5 g

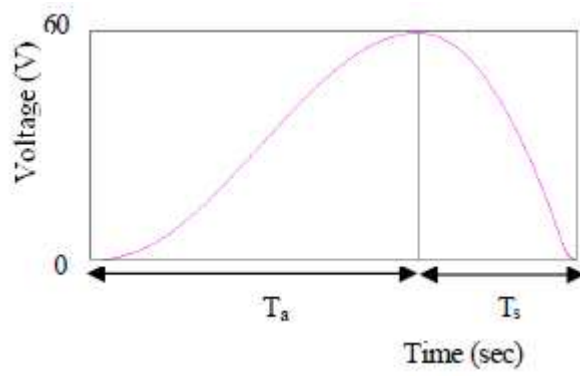


図 2-13 圧電素子の駆動波形

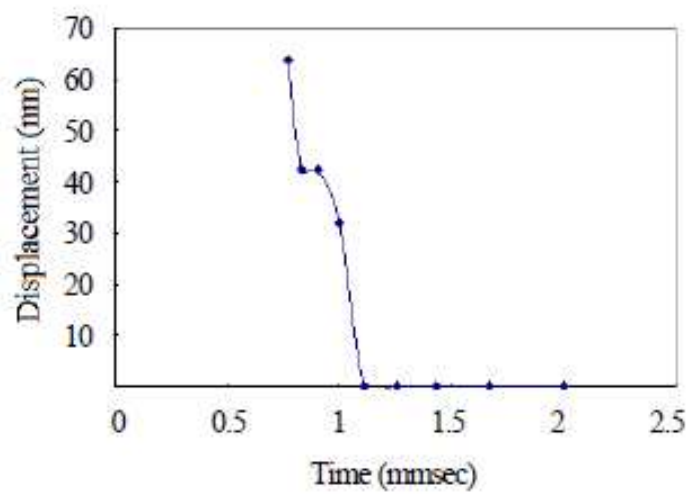


図 2-14 移動体の移動量と T_a の関係（緩慢動作時）

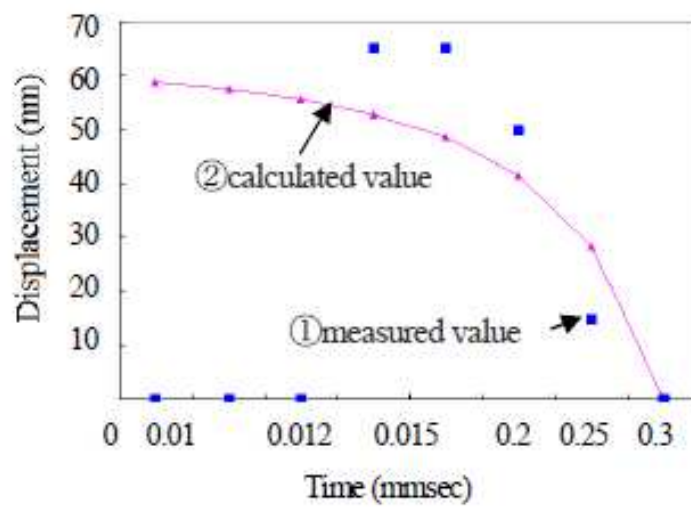


図 2-15 移動体の移動量と T_s の関係（急速動作時）

2.5 仕様設計

一般的な Blu-ray Disc 用ピックアップレンズの構成を図 2-16 に示す。Blu-ray Disc 用ピックアップレンズの調芯方法として、レーザ干渉計を用いたレンズの偏芯測定による調芯方法を図 2-17 に示す。干渉計とは測定対象を透過または反射した光が参照光と比べてどの程度遅れているかを干渉縞として測定・解析し、透過波面形状を求め、干渉縞を収差として定量的に評価するものである。図 2-18 は、一般的なレーザ干渉計を用いたレンズの偏芯測定方法を示しており、レーザをレンズユニットへ入射させ、球面原器から反射してきた透過波面収差を求め、光束の移動（干渉縞）を見て偏芯を測定する方法である[2-14]。レーザ干渉計をレンズ調芯に用いるため、被検レンズである移動可能なレンズ（レンズユニット上側のレンズ）を位置決め動作させる機構はレーザ干渉計の直下に配置されなくてはならない。また、使用するレーザ干渉計の波長は 405nm（青色）である。

圧電インパクト駆動による Blu-ray Disc 用ピックアップレンズの調芯機構の構成イメージを図 2-19 に示す。レーザ干渉計直下のテーブル上に V 溝 XY ステージが配置される。V 溝 XY ステージにはレンズ把持部が搭載されており、被検レンズを把持している。参照レンズと球面原器は専用ホルダーで設置されている。V 溝 XY ステージがインパクト駆動することで把持された被検レンズが精密（XY:±100nm、傾き:0.01 度以内）に移動し、これにより観察される干渉縞の形状が変化する。干渉縞の形状から被検レンズの参照レンズに対する偏芯状態を測定できる。被検レンズは色々な種類があり、寸法がそれぞれ異なり、直径 1～10mm、厚さ 0.4～1mm（テーパもあり）となっている。これらのレンズを簡単に、傾きを生じることなく把持することが必要である。また V 溝 XY ステージによる調芯操作は、従来の手作業での調芯作業と同様の操作手順を模倣し、操作の習熟度を要求しないものとする。

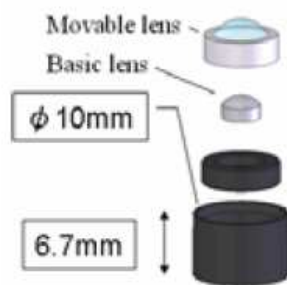


図 2-16 Blu-ray Disc 用ピックアップレンズの構成（出典：ナルックス株式会社）

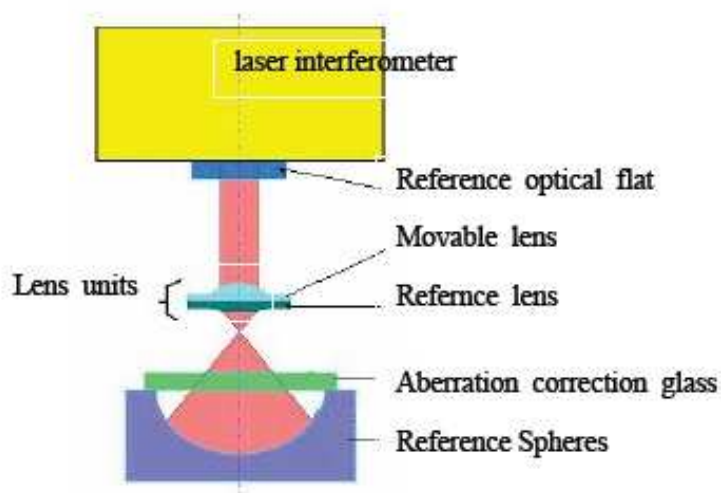


図 2-17 レーザ干渉計を用いたレンズ偏芯測定

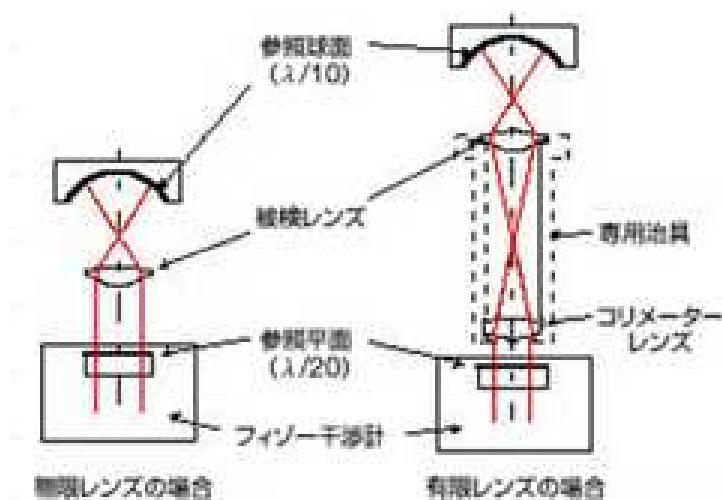


図 2-18 レーザ干渉計を用いたレンズ偏芯測定の一般例（出典：富士フィルム株式会社）

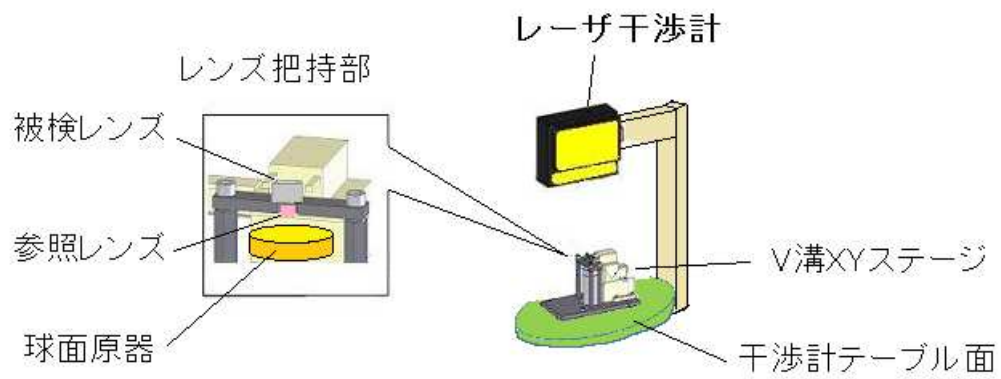


図 2-19 レーザ干渉計を用いたレンズ偏芯測定

2.6 V 溝 XY ステージ設計のための移動量計算シミュレーション

式 (2-25) を用いて V 溝 XY ステージ設計のための移動量計算シミュレーションを行った。XY ステージの移動体及び錘の質量をそれぞれ X ステージは 30g、錘 5g、Y ステージは 150g、錘 20g とし、圧電素子の最大変位量を $1.5\mu\text{m}$ 、静止摩擦係数を 0.1～0.6 まで変化させ、駆動周波数を 100～500Hz まで変化させた時、X ステージについては図 2-20 のような静止摩擦係数と T_a のおおよその関係が分かる。Y ステージは X ステージより質量が大きいのでゆっくり伸ばす時間はさらに短くなる。駆動周波数は、 T_a と T_s の和を 1 サイクルとした場合の単位時間当たりのサイクル数を意味する。モデル化及び実験では取り扱いを簡単にするために、 T_a と T_s のデューティ比を 9 対 1 として取り扱っている。そのため周波数(周期)を与えれば、 T_a と T_s が決まる。また駆動周期は T_a と T_s のデューティ比を 9 対 1 より、次式となる。

$$\text{駆動周期} = 1 / (\text{駆動周波数} \times 0.9) \quad (2-29)$$

この時の X ステージについて駆動周波数と移動体の移動距離を図 2-21 に示す。Y ステージについても同様に、圧電素子の最大変位量を $1.5\mu\text{m}$ 、静止摩擦係数を 0.1～0.6 まで変化させ、駆動周波数を 100～500Hz まで変化させた時の駆動周波数と移動体の移動距離を図 2-22 に示す。

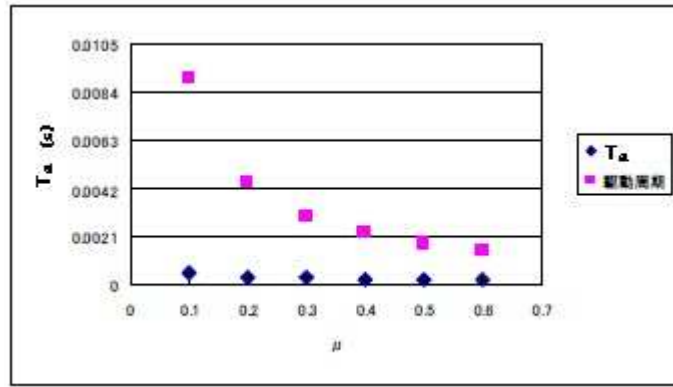


図 2-20 摩擦係数と T_a の関係 (X ステージ)

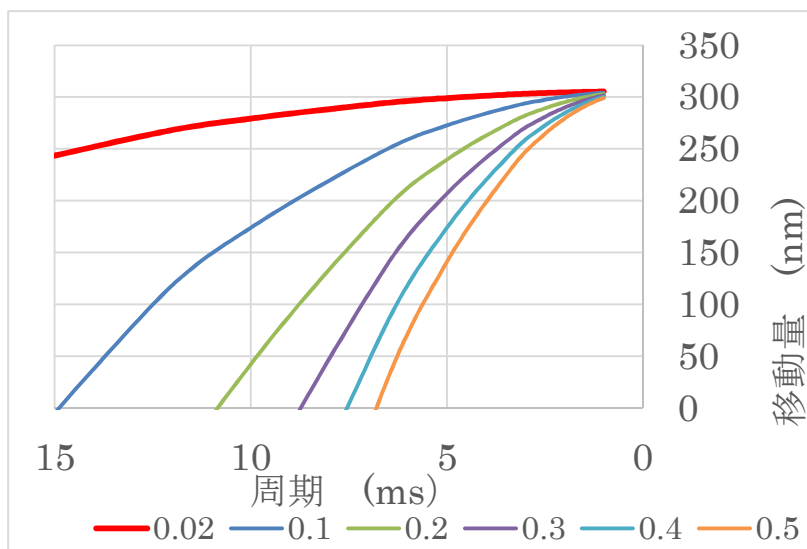


図 2-21 駆動周波数と移動量の関係 (X ステージ、圧電素子変位量 $1.5\mu\text{m}$)

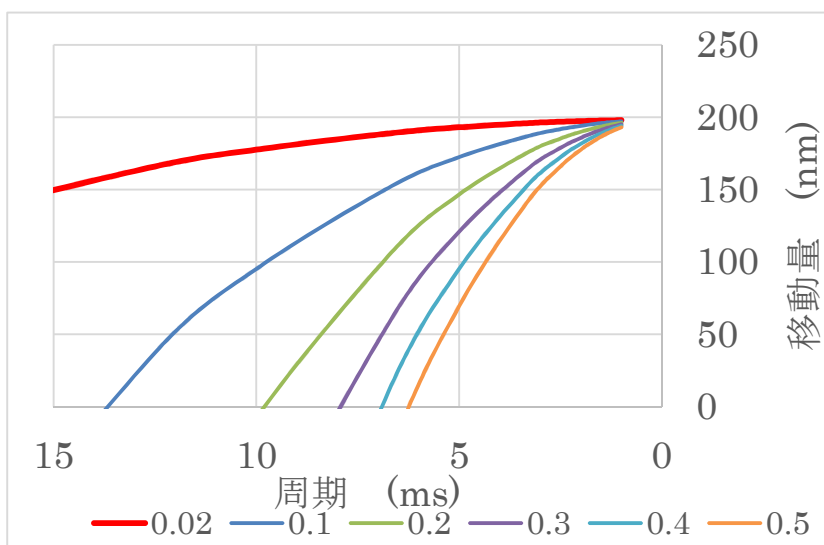


図 2-22 駆動周波数と移動量の関係 (Y ステージ、圧電素子変位量 $1.5\mu\text{m}$)

2.7 V 溝 XY ステージの試作

予備実験および移動量計算シミュレーションの結果を踏まえて、Blu-ray Disc 用ピックアップレンズの調芯機構に使用する V 溝 XY ステージを試作した。図 2-23 に V 溝 XY ステージの構成を示す。V 溝 XY ステージは積層型圧電素子（AE0203D04F、NEC トーキン製）を介して錘に接続され、それぞれ V 溝の案内面を摺動する。この V 溝のステージはダイス鋼を焼入（HRC59～62）後研削したものを使用し、経年変化を小さく押さえることを狙った。V 溝の案内面は研削仕上げ（ $R_{max} \leq 10\mu m$ ）とした。Y ステージの上に X ステージが搭載される構成となっている。X ステージは質量 32g で連結された錘の質量は 5g である。最大静止摩擦係数は実験から求め、0.18 だった。Y ステージは質量 149g で連結された錘の質量は 20g で、最大静止摩擦係数は 0.16 である。尚、レンズ保持部は X ステージ上に搭載可能である。図 2-24 に試作した V 溝 XY ステージを示す。

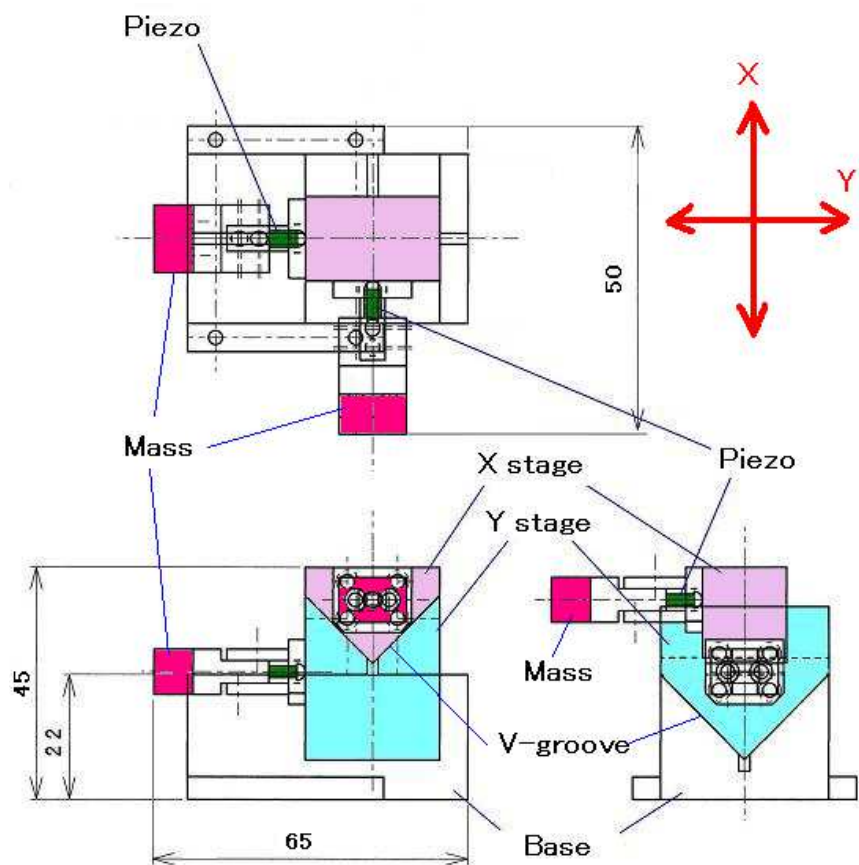


図 2-23 V 溝 XY ステージの構成

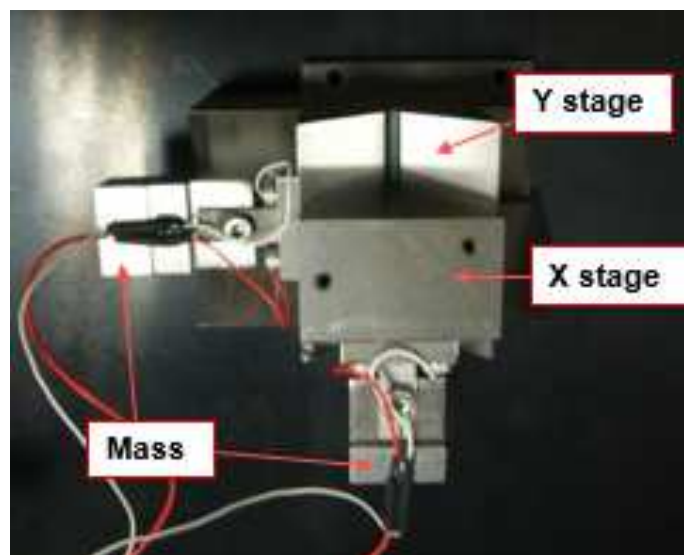


図 2-24 試作した V 溝 XY ステージ

2.8 V 溝 XY ステージの移動性能評価

試作した V 溝 XY ステージについて移動性能評価実験を行った。実験では圧電素子へ 33V 印加した時の圧電素子の最大変位量は約 $1.5\mu\text{m}$ で、シミュレーション値にあわせて V 溝 XY ステージを 100nm、50nm ステップで移動させ、順次位置決めしながら一定距離移動した際の移動量を静電容量変位計 (ADE マイクロセンス 3050) で測定した。V 溝 XY ステージの実験システム概略図を図 2-25 に、実験装置の構成を図 2-26 に示す。結果を図 2-27、図 2-29 に示す。オープンループによる位置決めにもかかわらず、比較的高い行き戻りの再現性が得られていることがわかる。実験条件を前述のシミュレーションモデルと比較し、図 2-28、2-30、表 2-2、2-3 にまとめた。X ステージ、Y ステージのステップ移動では、実際の T_a は要求される $\geq 0.0003\text{s}$ 、 $\geq 0.0004\text{s}$ を十分満たした。X、Y ステージともに 50nm ステップでの移動量のばらつきが大きく、25nm 程度のばらつきであることが分かった。V 溝 XY ステージの移動限界について調べるため、50nm ステップからさらに周期と圧電素子の最大変位量（電圧）を変化させて移動量を測定した。周期と最大変位量を変化させていくと、ステージの 1 ステップあたりの移動量が減少し、最終的には移動しなくなる。結果を図 2-31～図 2-40 に示す。モデル値と比較すると、周期 11ms の時、移動体の移動量はモデル値では 25 nm であるが、実験値では 10nm 以下で、さらに移動できていないステップがある。減少次に実際にレンズ調芯する場合を想定して、75nm ステップでの軸間のクロストークについて測定した。図 2-41～図 2-43 に測定結果を示す。図 2-31 は Y ステージの Y 軸方向へのステップ移動の様子を示している。およそ 1 ステップあたり 75nm の位置決めが前進・後退で実行できており、クロストークは見られない。図 2-32 は Y ステージをステップ移動させた時の X ステージの X 軸方向へのクロストークを示している。総移動量に対して、150nm のクロストークが観察された。この原因には、X ステージの重量が軽いいため X ステージの静止摩擦力が Y ステージの慣性力より小さいことが考えられる。その他の軸間（図 2-31）ではこのようなクロストークは見られなかった。また 75nm ステップでの移動量のばらつきは X、Y ステージともに 20nm 程度であった。

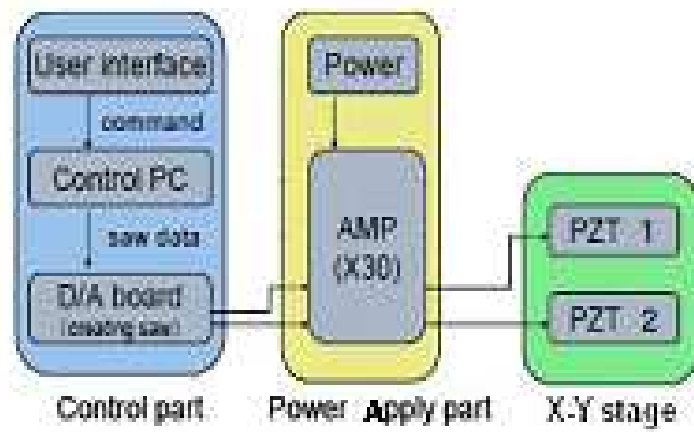


図 2-25 実験システム概略図

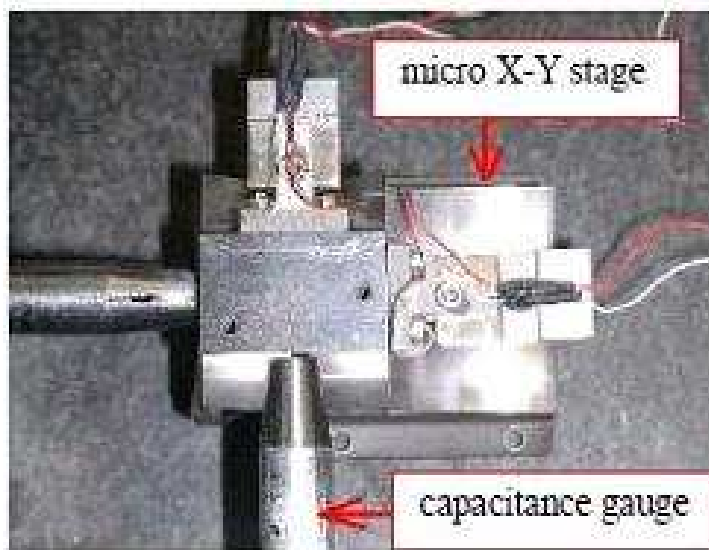
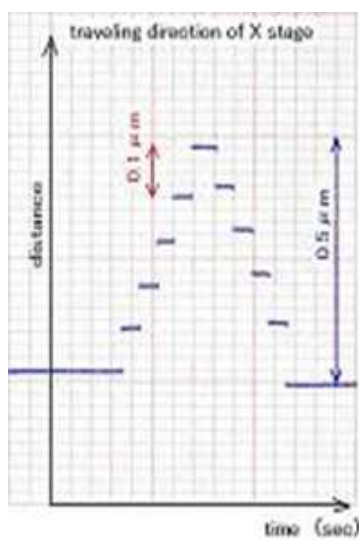
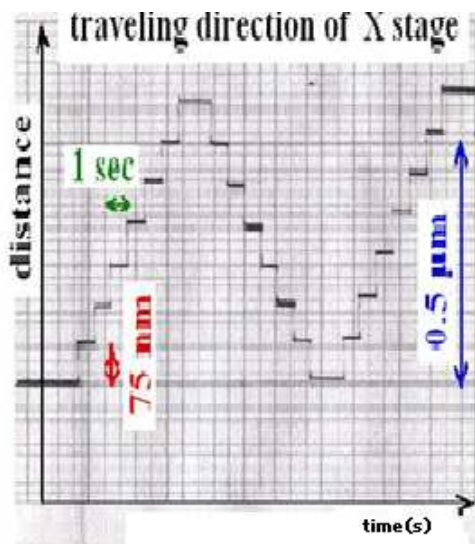


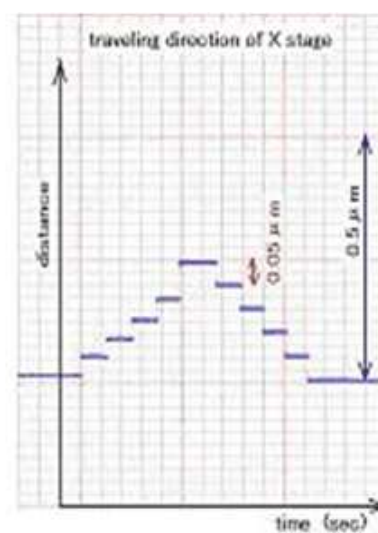
図 2-26 実験レイアウト



(a) 100nm ステップ



(b) 75nm ステップ



(c) 50nm ステップ

図 2-27 X ステージの移動性能

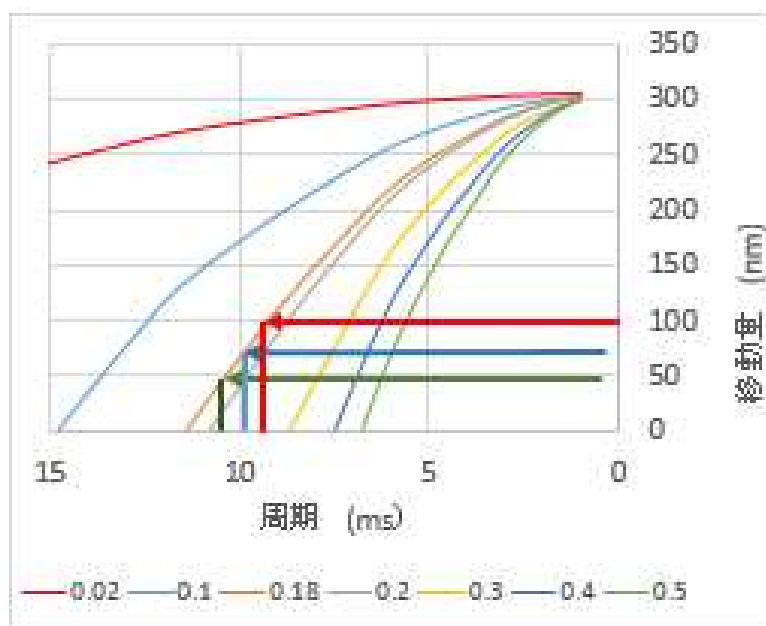


図 2-28 最大摩擦係数 0.18 (X ステージ) モデル値との比較

表 2-2 X ステージとモデル値の比較

100nm/1step

最大静止摩擦係数 0.18

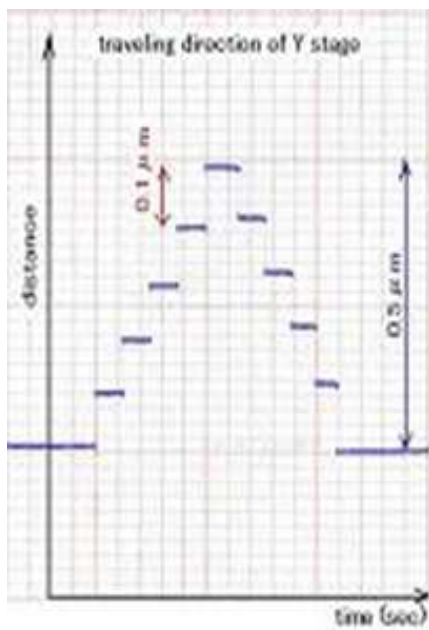
	移動体質量	おもり質量	圧電素子変位量	周期
	(g)	(g)	(μm)	(ms)
モデル	30	5	1.5	9.2
試作 X	32	5	1.5	8.8

75nm/1step

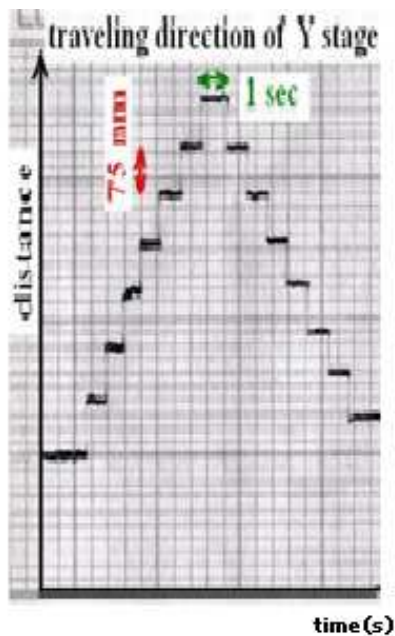
	移動体質量	おもり質量	圧電素子変位量	周期
	(g)	(g)	(μm)	(ms)
モデル	30	5	1.5	10
試作 X	32	5	1.36	10

50nm/1step

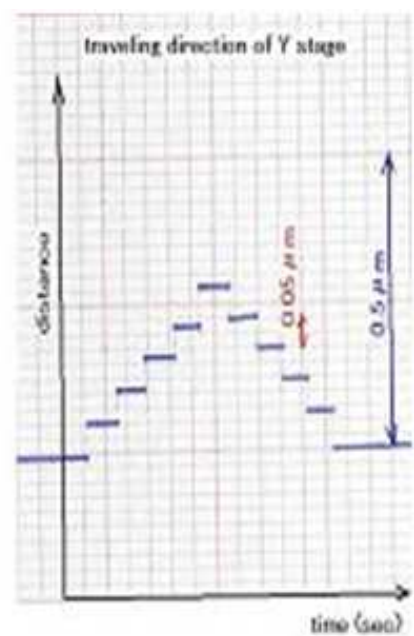
	移動体質量	おもり質量	圧電素子変位量	周期
	(g)	(g)	(μm)	(ms)
モデル	30	5	1.5	10.5
試作 X	32	5	1.54	10



(a) 100nm ステップ



(b) 75nm ステップ



(c) 50nm ステップ

図 2-29 Y ステージの移動性能

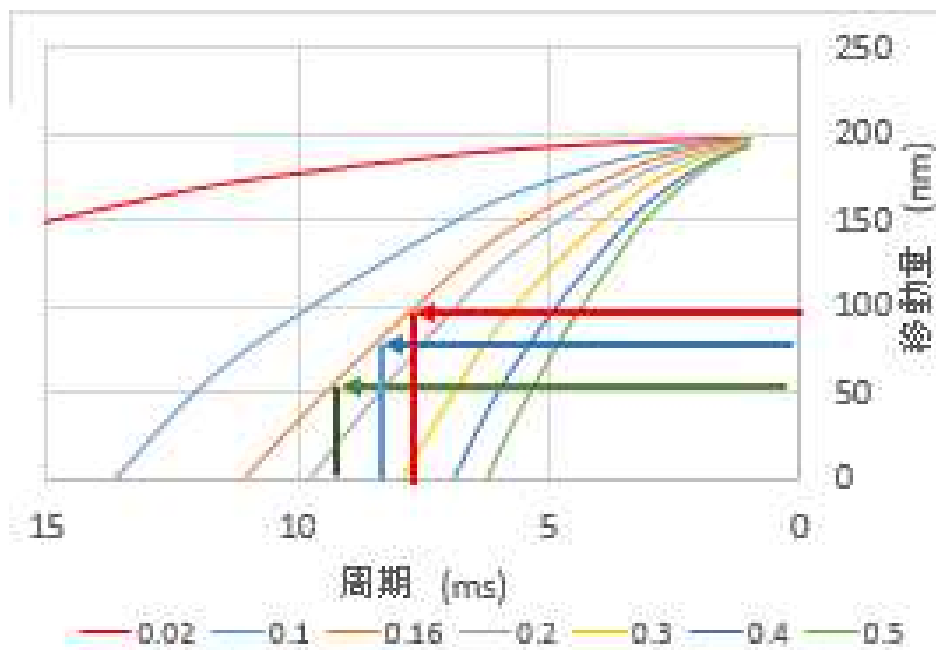


図 2-30 最大摩擦係数 0.16 (Y ステージ) モデル値との比較

表 2-3 Y ステージとモデル値の比較

100nm/1step

最大静止摩擦係数 0.16

	移動体質量	おもり質量	圧電素子変位量	周期
	(g)	(g)	(μm)	(ms)
モデル	185	20	1.5	8.7
試作 Y	149+37	20	1.56	7.8

75nm/1step

	移動体質量	おもり質量	圧電素子変位量	周期
	(g)	(g)	(μm)	(ms)
モデル	185	5	1.5	9.5
試作 Y	149+37	20	1.36	8.5

50nm/1step

	移動体質量	おもり質量	圧電素子変位量	周期
	(g)	(g)	(μm)	(ms)
モデル	185	5	1.5	10.2
試作 Y	149+37	20	1.27	9.5

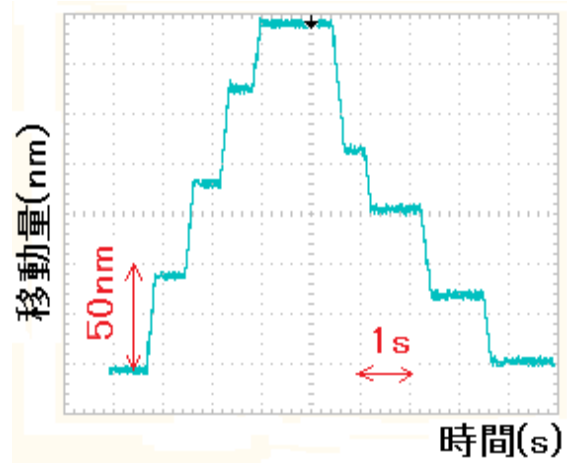


図 2-31 周期 10.5、圧電素子変位量 $1.5\mu\text{m}$ (X ステージ)

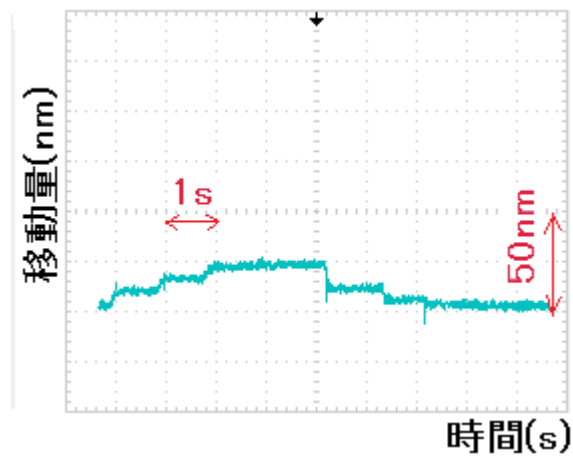


図 2-32 周期 11.0、圧電素子変位量 $1.5\mu\text{m}$ (X ステージ)

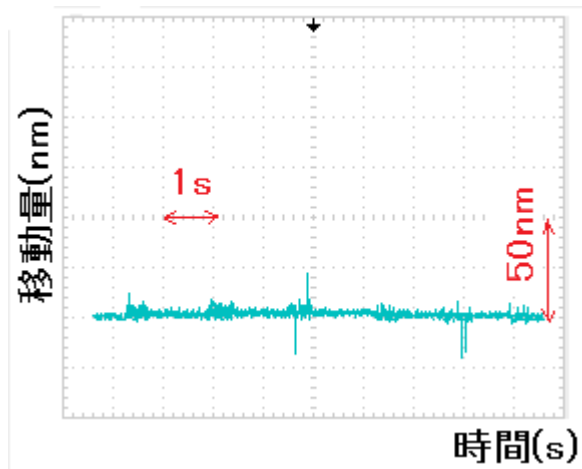


図 2-33 周期 12.5、圧電素子変位量 $1.5\mu\text{m}$ (X ステージ)

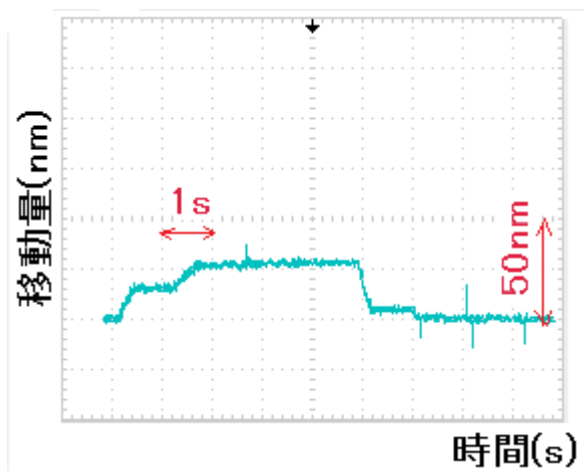


図 2-34 周期 10.5、圧電素子変位量 1.36 μm (X ステージ)

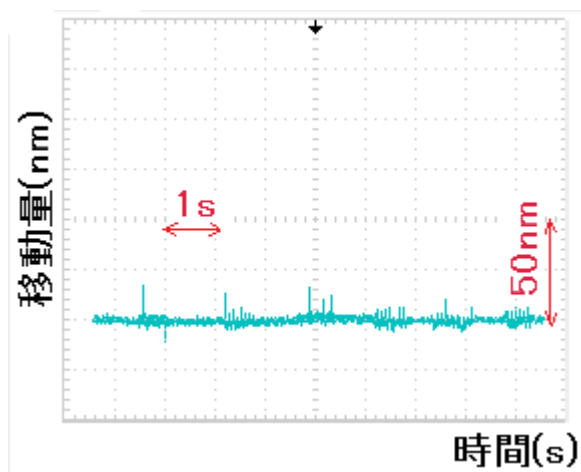


図 2-35 周期 10.5、圧電素子変位量 1.22 μm (X ステージ)

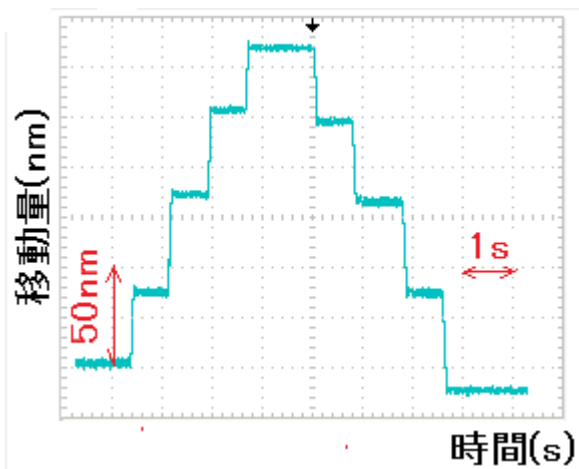


図 2-36 周期 10.5、圧電素子変位量 1.5 μm (Y ステージ)

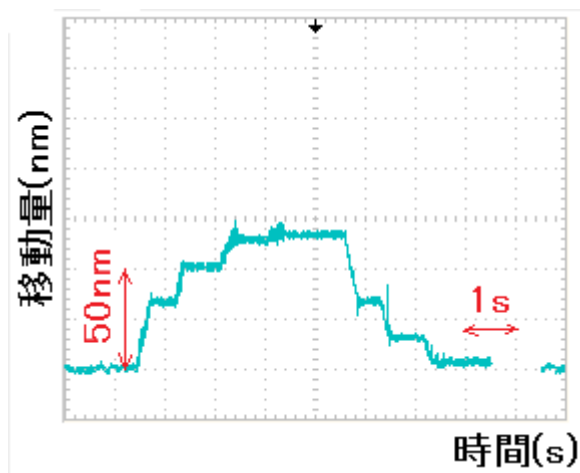


図 2-37 周期 11、圧電素子変位量 $1.5\mu\text{m}$ (Y ステージ)

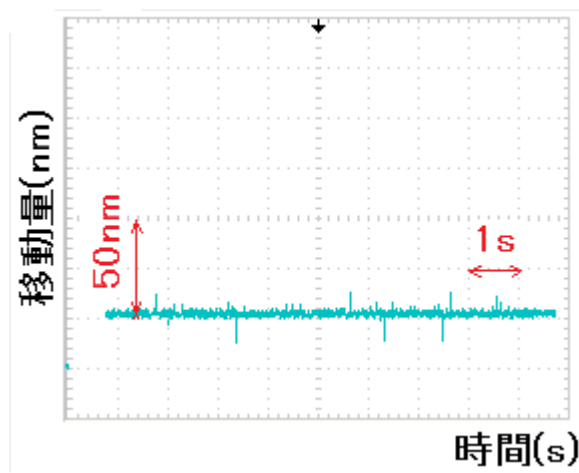


図 2-38 周期 12.5、圧電素子変位量 $1.5\mu\text{m}$ (Y ステージ)

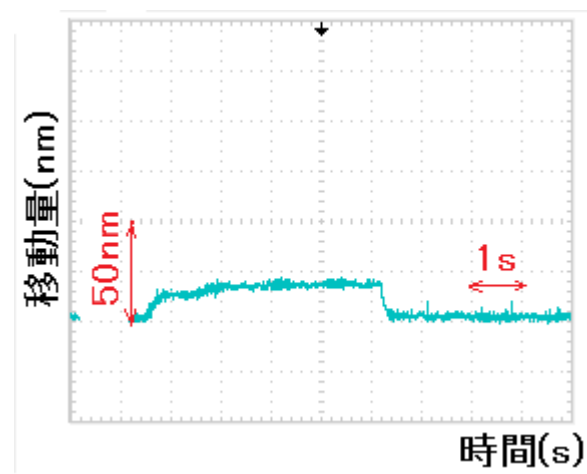


図 2-39 周期 12.5、圧電素子変位量 $1.36\mu\text{m}$ (Y ステージ)

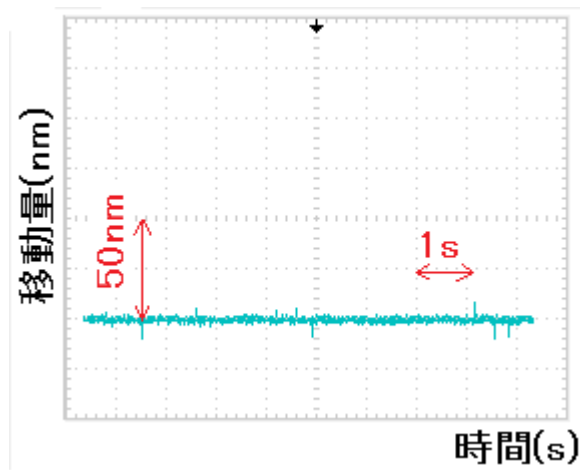


図 2-40 周期 12.5、圧電素子変位量 $1.22\mu\text{m}$ (Y ステージ)

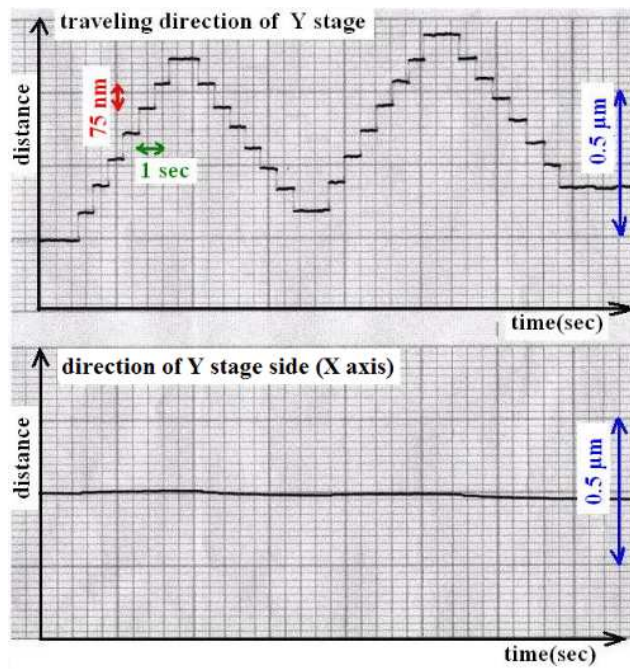


図 2-41 Y ステージの移動性能と X ステージの Y 軸側クロストーク

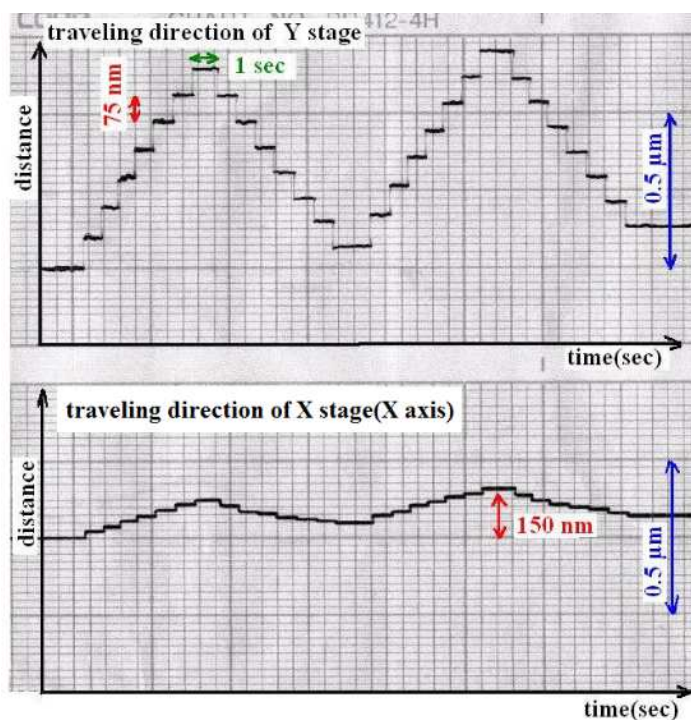


図 2-42 Y ステージの移動性能と X ステージの X 軸側クロストーク

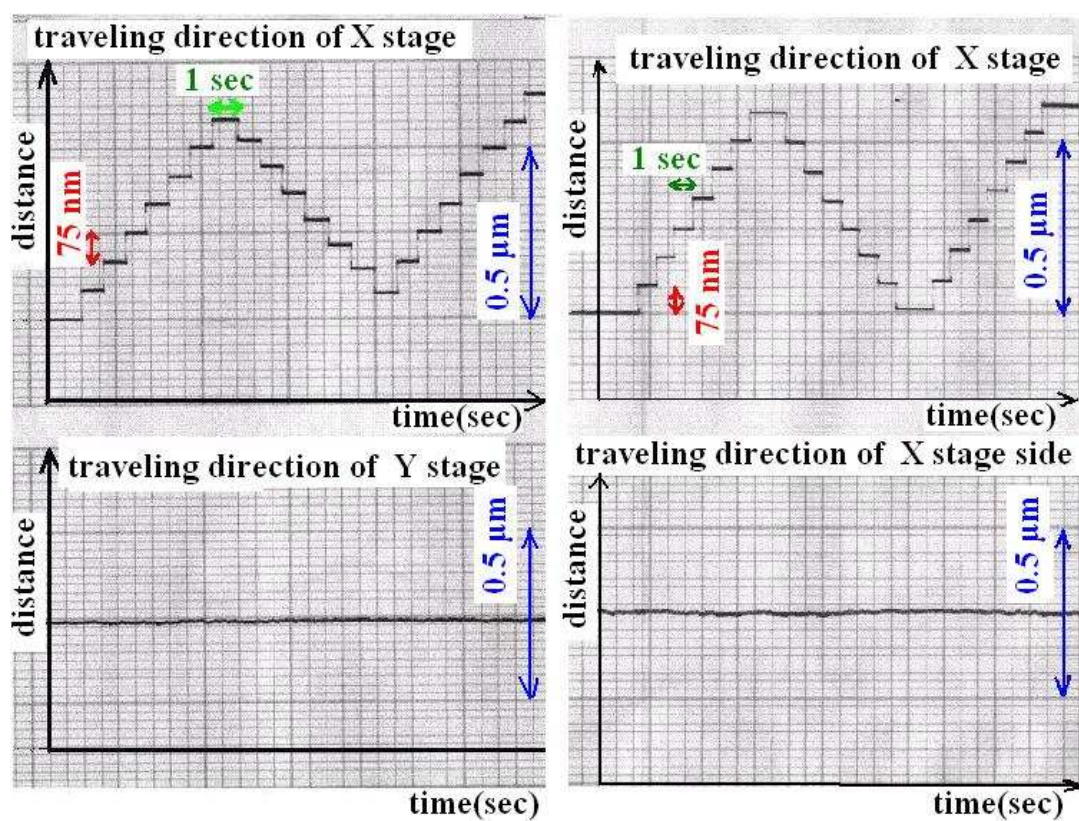


図 2-43 X ステージの移動性能（クロストークは見られない）

2.9 レンズ把持部の試作

携帯電話や DVD 用のマイクロレンズは急激な生産数量の増減があり、レンズユニット組立では様々な寸法形状のレンズに対応することが必要である。代表的な DVD 用マイクロレンズでは、レンズの直径、3～10mm、厚さ、0.4～1mm、レンズ側面形状（外周）はストレートおよびテーパ（抜き勾配）もある。このため安価でフレキシブルな把持機構の開発が望まれている。そこで図 2-44 に示すようなベアリングとばねを用いた把持機構を開発した。レンズを精密に保持するために、3 点のピンで押さえている。保持状態のレンズの傾きは 0.01 度以内が必要である。レンズ把持部の仕様を表 2-4 に示す。試作したレンズ把持部を図 2-45 に示す。ピンとレンズの接点の様子を図 2-46 に示す。

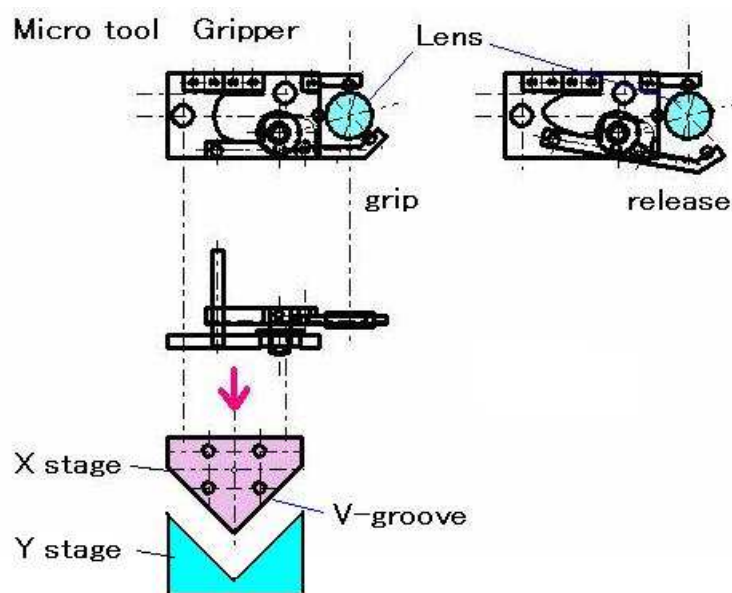


図 2-44 レンズ把持部の構成

表 2-4 レンズ保持部仕様

対象レンズ寸法	直径 $\phi 3 \sim 10\text{mm}$ 、厚さ $0.4 \sim 1\text{mm}$
対象レンズ形状	外周ストレート、外周テーパ
保持方式	板ばね保持
保持状態	保持強さによるゆがみがないこと
傾き	0.01 度以内
	接着剤塗布時に動かないこと
	接着剤硬化時に動かないこと
レンズ把持部寸法	$W45 \times D15 \times H10\text{mm}$

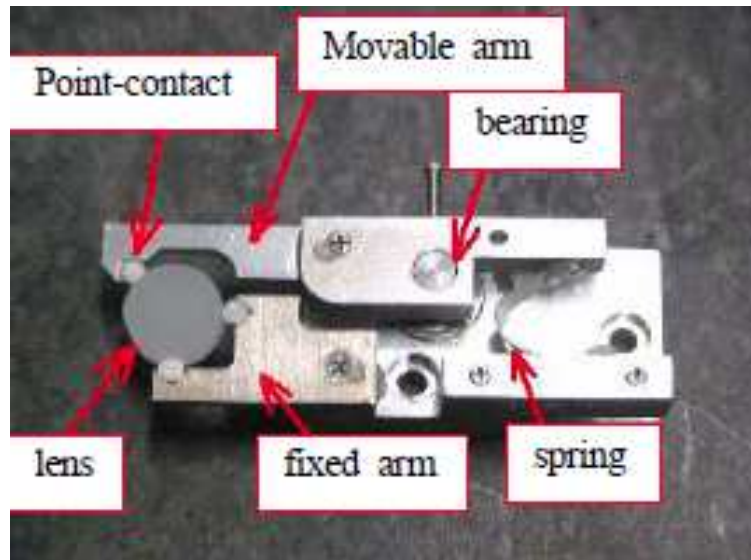


図 2-45 試作したレンズ把持部



図 2-46 ピンとレンズの接点の様子

2.10 レンズ把持部搭載後の V 溝 XY ステージの移動性能評価

V 溝 XY ステージの X ステージ上に試作したレンズ把持部を搭載した。その後、前述 2.8 の実験と同様にステージが軸上を順次位置決めしながら一定距離移動した時、レンズの代わりにミラーを把持して、オートコリメータ（駿河精機株式会社 H350E(B-C)）を用いてミラーの傾き角度について調べた。本オートコリメータは測定範囲 ± 1 度で $1/1000$ 度の分解能を有する。図 2-47 にオートコリメータの測定原理を示す。オートコリメータは平行光を対象物に照射し、その戻り光の結像位置のずれから対象物の傾き角度を測定する。図 2-48 に実験装置の構成を、図 2-49 に実際の実験の様子を示す。図 2-50 に Y ステージの移動性能とクロストークを、その時の把持したミラーの傾きを 図 2-51 に示す。また図 2-52 に X ステージの移動性能を、その時の把持したミラーの傾きを 図 2-53 に示す。レンズ把持部搭載後の XY ステージの位置決め分解能はそれぞれ 85nm、75nm となった。X ステージの位置決め分解能が、レンズ把持部搭載前と比べると、10nm 悪くなった。この原因は、レンズ把持部の形状によるものと考えられる。レンズ把持部は X ステージ上に 2 か所のねじにより固定されているが、レンズを把持しているアームとミラーが X ステージ上から、X ステージの進行方向へと突き出した構成となっており、レンズ把持部搭載後の X ステージの重心位置を変化させている。このため、圧電素子による衝撃力の発生位置が X ステージの重心とわずかにずれたために、X ステージの動作状態が変化し、位置決め分解能が悪化したものと考えられる。レンズ把持部搭載後のクロストークは、搭載前(クロストーク量、21.4nm/1step)よりも小さく(搭載後クロストーク量、20nm/1step)なった。原因は、レンズ把持部を搭載したことで X ステージの質量が増加したためと考えられる。一般にレンズの調芯組立では、X 軸側、Y 軸側と交互にレンズを移動させて調芯を行い、調芯の最終段階では、その移動量は 1 ステップ（または干渉計の $1/2$ 波長程度）となり、調芯完了となる。クロストークの量が 20nm/1step であることは、実際の Blu-ray Disc 用ピックアップレンズ調芯作業で用いるレーザ干渉計（波長 405nm）の干渉縞間隔が約 200nm であることから、干渉縞観察による精度の $1/10$ に相当し、干渉縞では観察できない非常に小さなクロストーク量であると言え、無視できる量である。またミラーは 0.01 度以内の傾きであることが観察された。図 2-5 の装置では 4 点支持によるレンズ保持であったために、保持状態が不安定であるという問題があったが、本試作機のレンズ保持部は 3 点支持であるため、安定した保持状態を簡単に実現・維持することができた。

このため、試作機にはクロストークがあるものの、Blu-ray Disc 用ピックアップレンズの調芯組立作業において十分に使用可能であることが分かった。

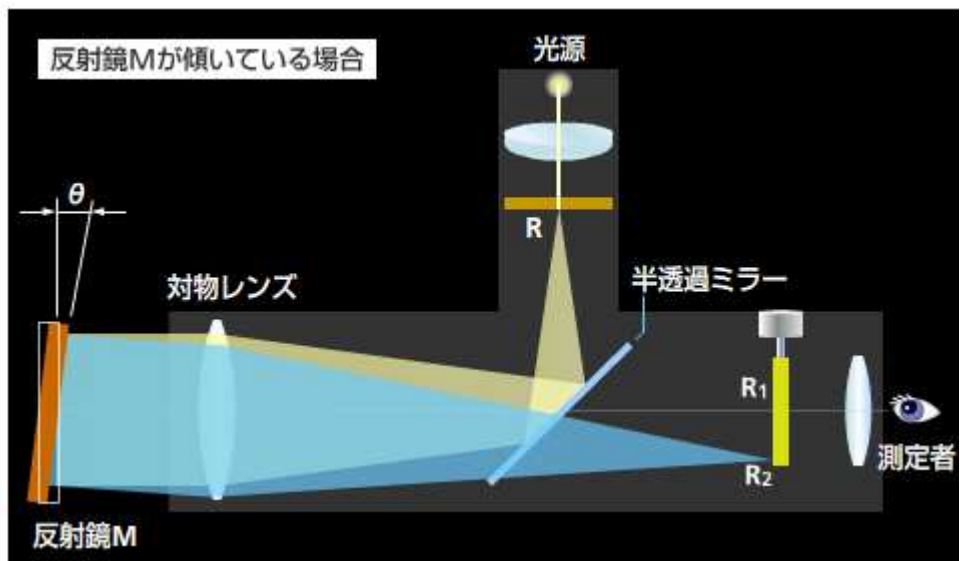


図 2-47 オートコリメータの測定原理

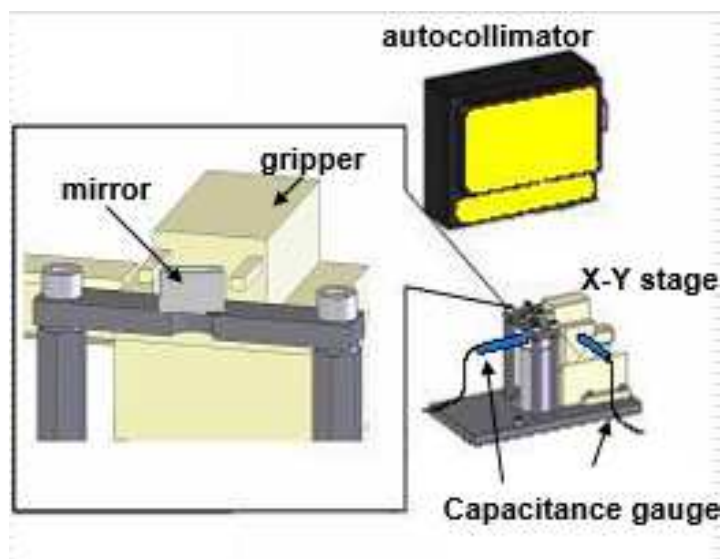


図 2-48 レンズ把持部搭載後、オートコリメータによる角度測定実験構成

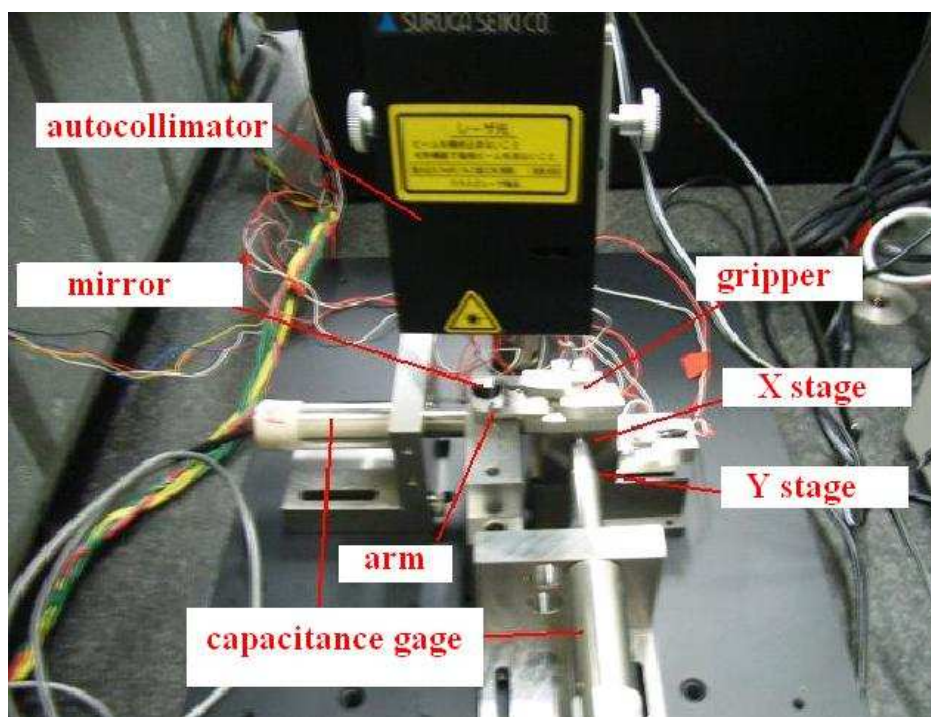


図 2-49 レンズ把持部搭載後、オートコリメータによる角度測定実験の様子

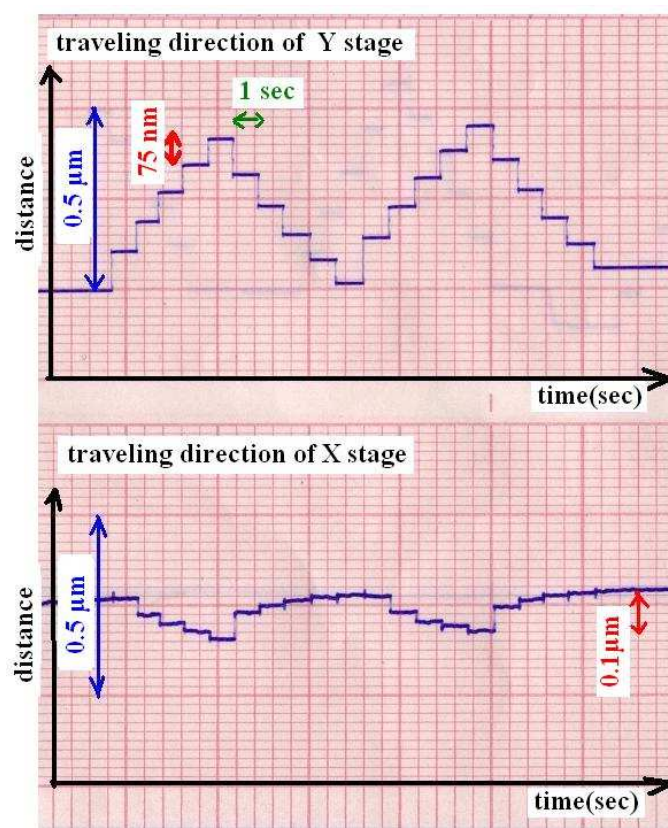


図 2-50 Yステージの移動性能とXステージのX軸側クロストーク(レンズ把持部搭載後)

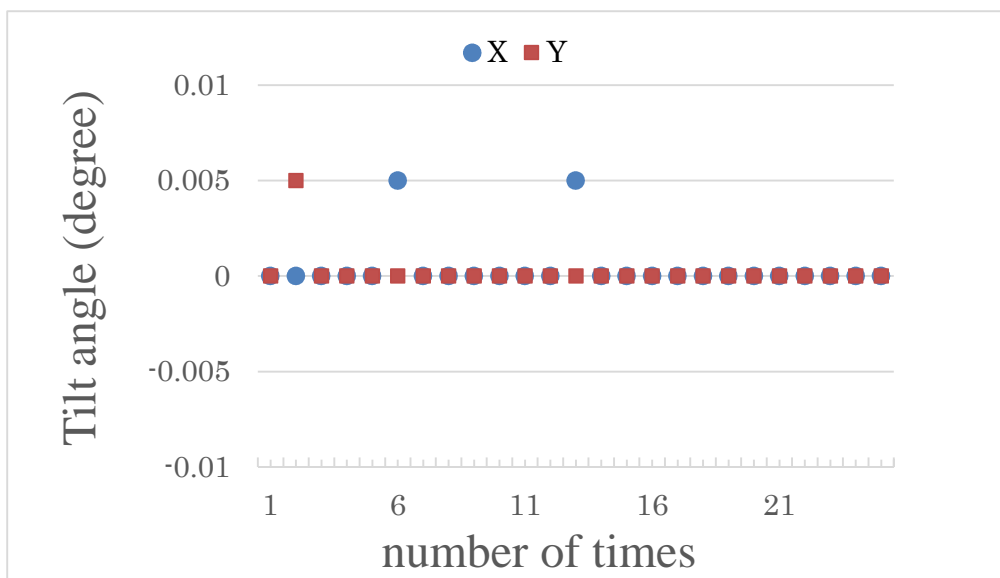


図 2-51 把持したミラーの傾き（Y 軸動作）

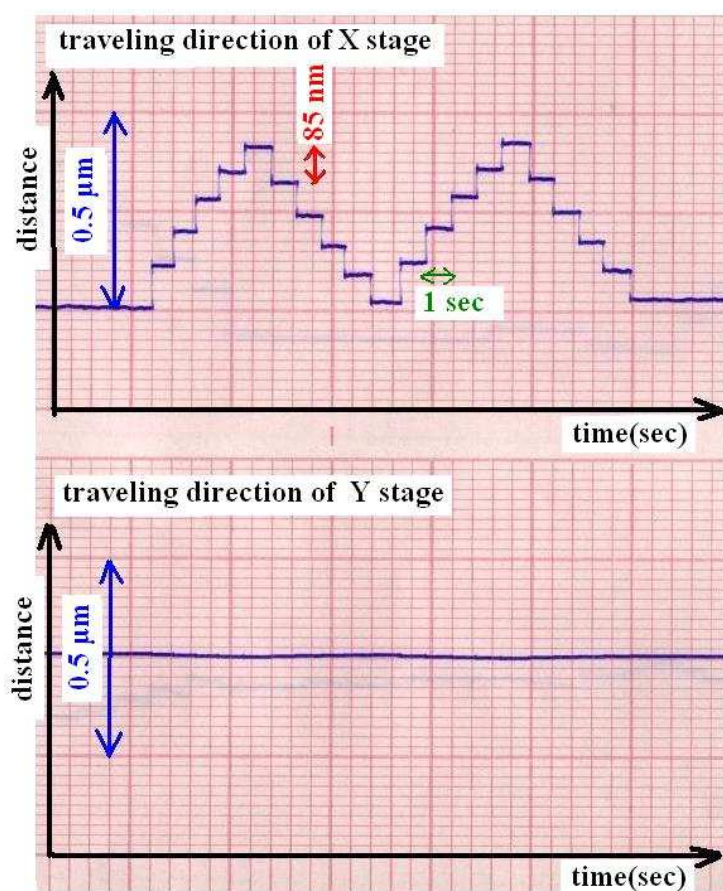


図 2-52 X ステージの移動性能と X ステージの Y 軸側クロストーク（レンズ把持部搭載後）

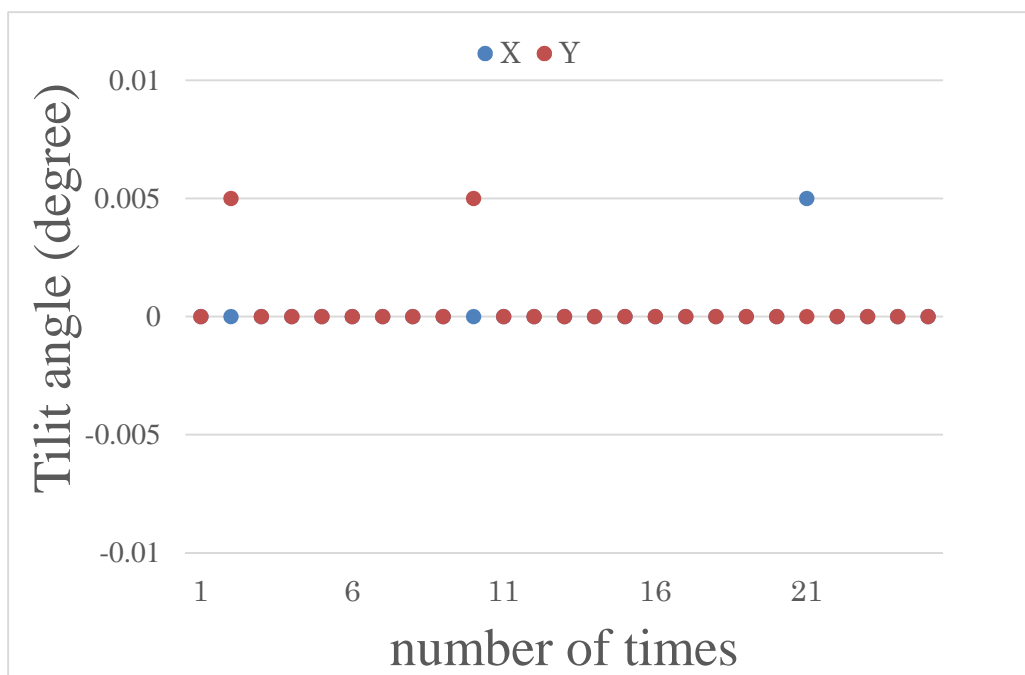


図 2-53 把持したミラーの傾き (X 軸動作)

2.11 V 溝 XY ステージ機構を用いた Blu-ray Disc 用ピックアップレンズの調芯

試作した V 溝 XY ステージ機構を用いて実際に Blu-ray Disc 用ピックアップレンズの調芯作業を行った。作業の構成を図 2-54 に、作業の様子を図 2-55 に示す。レーザ干渉計はナルックス株式会社が提供したもので、波長 405nm（青色）である。干渉縞間隔は 202.5nm である。V 溝 XY ステージ機構はレーザ干渉計の直下に設置されている。ピックアップレンズは 2 枚が重なった配置になっており、上側の可動用レンズを把持して調芯する。調芯作業は、レンズを V 溝 XY ステージ機構のレンズ把持部で把持した状態で、XY ステージにより、X 軸側、Y 軸側へ移動させ、そのときの干渉縞を観察することでレンズの偏芯を測定する。調芯作業の拡大図を図 2-56 に示す。調芯時の干渉縞の様子を図 2-57 に示す。(a)のときは調芯前であり、干渉縞が画面全体に大量に現れている。干渉縞を観察しながら V 溝 XY ステージ機構を用いてレンズを移動させていき、(b)のように干渉縞が数本になるようにレンズを移動させる。干渉縞が 3 本見えていれば、 $202.5\text{nm} \times 3$ 本で 607.5nm だけ、位置決めしたいレンズが参照球面に対して偏芯した位置にいるということである。この状態からさらにわずかに XY ステージをステップ移動させて干渉縞がなくなる状態まで調芯する。干渉縞が 1 本見えていれば、202.5nm の偏芯状態であるため、100nm 程度でレンズを移動・位置決めする必要がある。本試作機では X ステージ、85nm/1step、Y ステージ、75nm/1step で位置決めを行っている。このようにして干渉縞が観察されなくなったとき、偏芯ゼロで調芯が完了する(c)。図 2-57(c)に示すように本試作機を用いて Blu-ray Disc 用ピックアップレンズの調芯作業を行い、偏芯ゼロの調芯に成功した。レンズ外形寸法の画像情報などを基準としてレンズの中心位置を調芯する方法ではなく、レーザ干渉計を用いて、参照球面からの偏芯量を測定することで、ピックアップレンズの光学特性が最も良くなる偏芯ゼロの位置にレンズを位置決めする調芯方法は、優れた調芯方法である。この調芯方法に試作した V 溝 XY ステージ機構を用いることで、簡単な操作で精密なレンズの位置決めが可能となった。

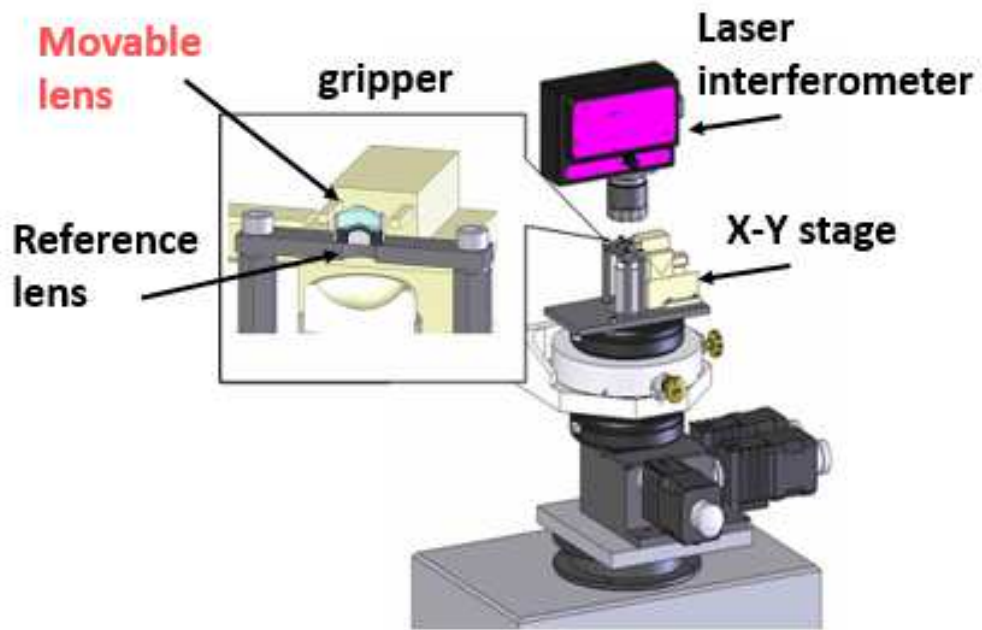


図 2-54 レーザ干渉計を用いたレンズ調芯作業の構成

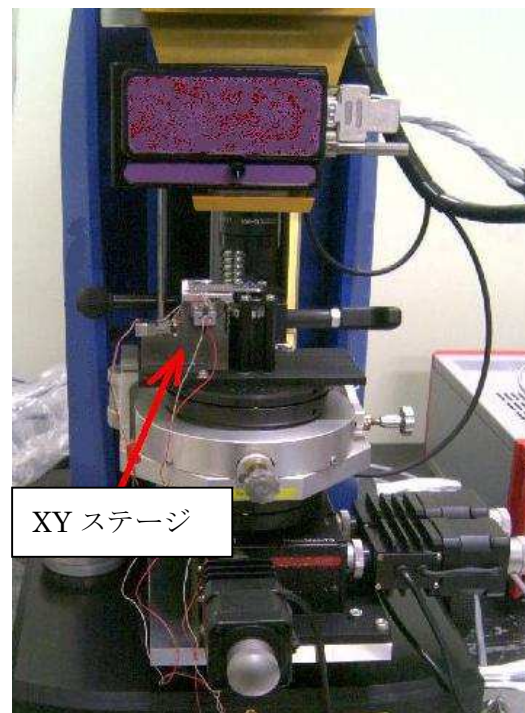


図 2-55 レーザ干渉計を用いたレンズ調芯作業の様子

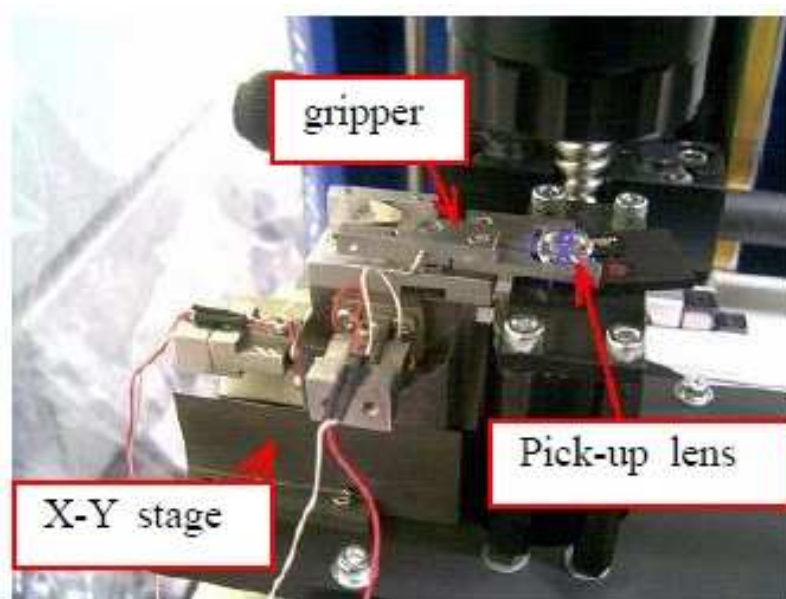


図 2-56 レンズ調芯作業の拡大図

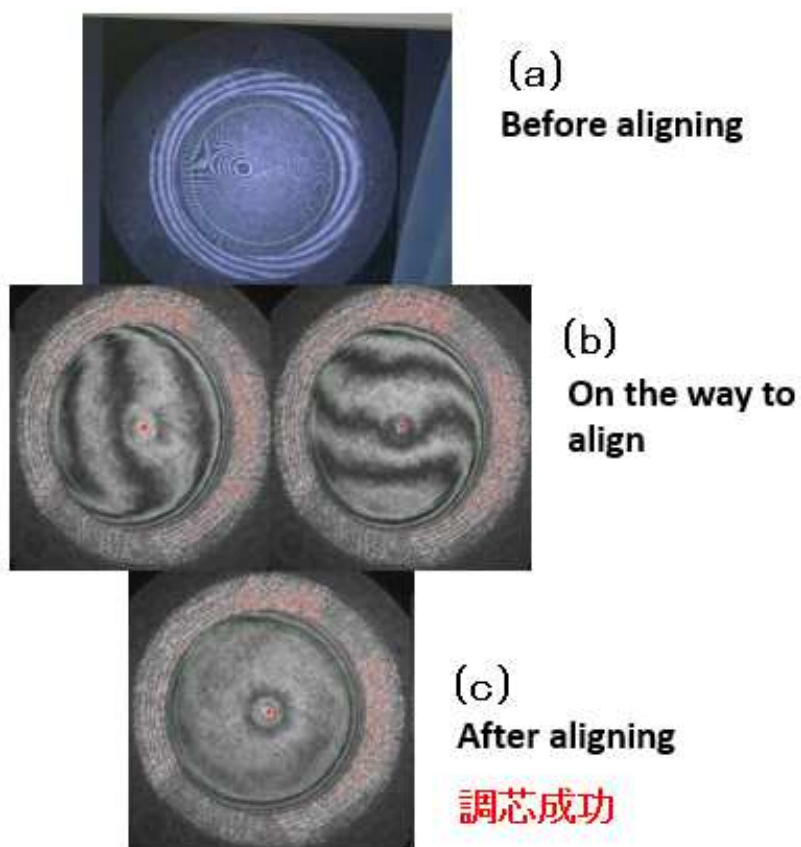


図 2-57 レンズ調芯時の干渉縞の様子

2.12 まとめ

本章では最初に Blu-ray Disc 用ピックアップレンズの調芯作業について説明し、要求されている調芯装置の仕様について示した。装置の要求仕様の目標値は高精度な位置決め（XY:100nm、傾き：0.01 度以内）が可能で、操作性が良く簡便な方法で汎用性が高いことである。調芯装置に圧電インパクト駆動を用いた場合、高分解能な位置決めと無制限の稼動範囲が得られるため応用範囲が広く、構造が簡単で小型化に適していると考えられた。

そこで最初に圧電インパクト駆動による超精密位置決めの動作原理について説明した。圧電素子の駆動電圧波形に、のこぎり波形を用いた場合の駆動周波数と移動体の移動量の関係について摩擦係数を変化させて示した。

次に Blu-ray Disc 用ピックアップレンズの調芯用の装置の仕様について述べた。レンズ調芯方法としてレーザ干渉計による偏芯測定について説明し、レンズの調芯機構の概略を示した。圧電インパクト駆動を Blu-ray Disc 用ピックアップレンズの調芯機構に適用し、開発した圧電インパクト駆動式 V 溝 XY ステージについて説明した。V 溝 XY ステージの位置決め性能について 100nm、75nm、50nm ステップでの計測結果を示した。レンズ把持部を V 溝 XY ステージ上に搭載し、レンズ調芯用の V 溝 XY ステージ機構を構成した。レンズ把持部搭載後の V 溝 XY ステージの位置決め性能、把持によるレンズの傾きについて実験評価し、位置決め分解能 85nm、レンズ傾斜角度 0.01 度以下の良好な結果が得られ、目標を達成できた。レーザ干渉計（青色、波長 405nm）を用いて干渉縞を観察しながら XY ステージを駆動させて実際にレンズ調芯を行い、偏芯のない位置決めに成功した。このことから V 溝 XY ステージ機構が Blu-ray Disc 用ピックアップレンズの調芯作業において有用であると考えられる。

第3章 ニードル式液滴塗布装置とニードル先端接触検知法

3.1 はじめに

近年、プリントド・エレクトロニクス (Printed Electronics or PE) 技術が注目されている。PE 技術とは、従来の印刷技術をもとに、その精度を上げたり、機能を追加するなどした新しい印刷技術を活用したデバイス (電子回路、センサー、素子等) 製造技術 (図 3-1) である[3-1]。従来は、これらの製造には、主にフォトリソグラフィ技術を用いていたが、製造コストが高く、安価な製品製造ができない。PE 技術は、フォトリソグラフィ技術のマスクレス製造方法であって、露光やエッチング等の作業工程を行う必要がないために、製造コストを抑えることができ、また、使用する化学物質の低減が可能である。PE 技術の主なものには、孔版を使うスクリーン印刷技術 (図 3-2) や直描のインクジェット技術 (図 3-3) があり、また、新しい PE 技術としてレーザ転写法 (図 3-4) 等も開発されており、非常に活発な分野となっている[3-2]。PE 技術が応用される製品の代表的なものには、スマートフォンや太陽電池があり、低電力、高効率、安価であることが求められている。低電力、高効率を実現する 1 つの要素には、極細配線 (線幅 $50\mu\text{m}$ 以下) の低抵抗値化がある。極細配線で高集積を行うと高効率が得られるが、極細配線であるために高アスペクトパターン (例 1:5 線幅 1 に対して線厚さ 5) の実現が難しく、配線厚さ (膜厚) は薄くなり、抵抗値は下がらない。配線材料である導電性材料を高粘度 (粘度 1000mPas 以上) で利用することで、高アスペクト比を期待できるが、現状の PE 技術の主流であるスクリーン印刷技術やインクジェット技術では、導電性インク (粘度 $1\sim 30\text{mPas}$) しか使用できず、粘度は極めて低い[3-3]。粘度が低いと塗布した液体は広がりやすく、結果、線幅も増加する傾向があり、液体粘度・膜厚と線幅はトレードオフの関係にある[3-4,5,6]。また、空圧式ディスペンサ等では高粘度が利用できるが、塗布直径 ($500\mu\text{m}$ 以上) が非常に大きく、微量塗布による極細パターンはできない。スクリーン印刷技術やインクジェット技術のいずれの技術も、微小な隙間を液体が通るために、詰まりやムラが生じるため、使用液体の粘度に制限がかかり低粘度しか使用できない。高粘度の液体を詰まらせることなく、つまり隙間からの吐出を利用せずに、極微量、塗布することができれば低抵抗値化が図れる。また、製品価格を下げる点では、PE 技術のように直接描画、直接印刷 (マスクレス) 製造方法を利用することが望ましい。

ニードル式液滴塗布装置は、新たな PE 技術であり、ニードルを用いて液滴を塗布する装置である[3-7]。ニードル式液滴塗布装置では様々な液体を塗布することが可能で、例えば導電材料やバイオ材料、量子ドット等の塗布が行える[3-8]。ニードル式液滴塗布装置を用いて塗布を行う際には塗布ギャップを管理する必要がある。塗布ギャップが変動すると塗布直径がばらつき、また塗布ギャップがゼロの時、ニードルと塗布基板は衝突し損傷する。このためニードルと塗布基板の接触状態を検知する必要がある。

本研究ではさらにニードル先端接触検知法に着目し、ニードルを機械共振機構で微小振動させ、先端部の液滴が対象物に接触した瞬間に機械共振点を変化することを利用して、接触検知を行う方法である。ニードル直径、液体粘度、塗布基板を変化させて、ニードル先端液

滴の塗布基板への接触検知実験を行った。ニードル直径 100 μm 、シリコーンオイル粘度 100～100,000mPas の高粘度液体を用いて実験を行い、接触時に共振周波数や振幅の変化から、ニードル先端部の液滴が塗布基板への接触した瞬間の検知に成功した。またニードル振動を用いた塗布により、塗布した液滴の直径ばらつきを低減することができた。



図 3-1 フォトリソグラフィ技術と PE 技術の工程の違い

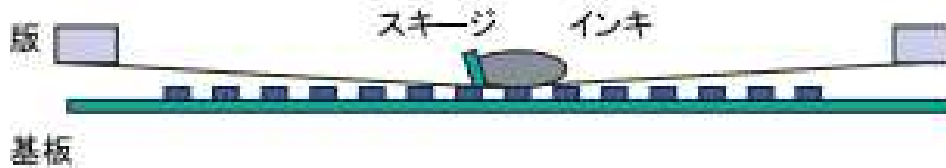


図 3-2 スクリーン印刷技術の原理（出典：日本印刷学会誌、第 43 巻、第 1 号（2006））

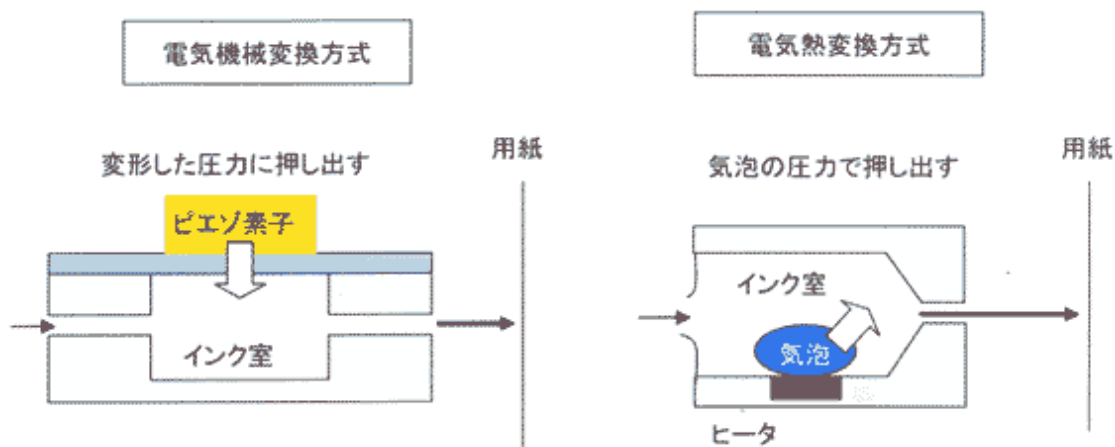


図 3-3 インクジェット印刷技術の原理（出典：宮崎技術研究所）

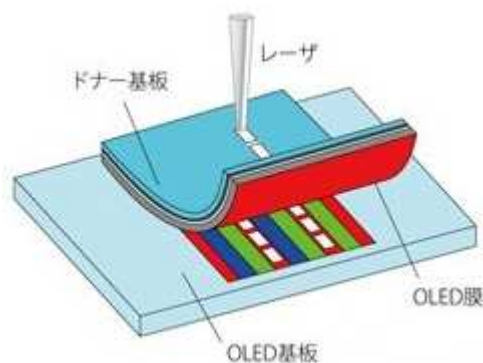


図 3-4 レーザ転写法（出典：株式会社マイナビ）

3.2 ニードル式液滴塗布装置

図 3-5 にニードル式液滴塗布装置を示す。ニードル式液滴塗布装置はニードル、ニードル駆動用 Z ステージ、液体の充填されたピペット、塗布基板を設置する XY ステージから構成される。ニードルは Z ステージにより駆動し、ピペット内を上下に動き、ニードル先端に付着した液体が塗布基板表面に接触することで塗布される。塗布位置は XY ステージにより位置決めされる。ニードル式液滴塗布装置の主な仕様は次の通りである。

Z ステージ：0.25 μ m 位置決め分解能、10mm ストローク

XY ステージ：0.25 μ m 位置決め分解能、25mm ストローク

ニードル式液滴塗布装置の塗布原理を図 3-6 に示す。①は初期状態である。ピペット内には液体が充填されており、ニードルはピペット内に下されている。②の時、ニードルは Z ステージにより下方へ移動しピペットを貫通する。ニードル先端には液体が付着している。③の時、ニードル先端に付着した液体が塗布基板に接触して塗布が実行される。ニードル先端に付着した液体と基板の接触の検出にはマイクロスコープを用いて、高倍率観察を行っている。ニードル先端の液体は基板に接触した瞬間に、形状が変化するため、その変化を観察により検出している。④の時、ニードルは Z ステージにより上方へ移動し、基板上には接触した液体が付着し、塗布が完了する。以下、①～④を繰り返すことで連続した塗布が行われる。

従来の空気圧式ディスペンサ、インクジェット式ディスペンサとニードル式液滴塗布装置の性能の比較を図3-7に示す。ニードル式液滴塗布装置は、高粘度の液体をpLオーダーで塗布可能であるという点において、従来の微量液滴塗布技術より優れている。しかし、塗布原理③のように、ニードル先端の液体と塗布基板が接近するとき、塗布ギャップ（図3-8）が生じる。塗布ギャップが変動することで塗布直径にばらつき（図3-9）が生じ、塗布ギャップがゼロの時、ニードル先端と基板は接触し損傷する。したがって、一定の塗布ギャップで液滴を塗布することが求められている。

現状では、塗布ギャップを調整するために、顕微鏡の画像を用いて、人間が手動で調整している。そのため、塗布量の精度向上のためには、塗布ギャップを自動検知可能なセンサが必要とされている。これまでに、塗布ギャップを自動検知する手法として、図3-10のような光電センサを用いる手法が提案されてきた[3-9,10,11]。しかし、光を用いるため、液体の透過性によって受光量に変化が生じてしまい、適切に塗布ギャップを検知できないことがある。また、4台の光電センサを用いるため、装置の規模、コストの増加といった問題が生じている。

そこで、本研究では、ニードルに微小振動を与え、ニードル振動特性変化を用いて、ニードル先端の液滴と塗布面との接触・非接触を検知する手法を提案する。これにより、一定の塗布ギャップで液滴が塗布可能となり、液滴塗布量の制御が可能になると考えられる。

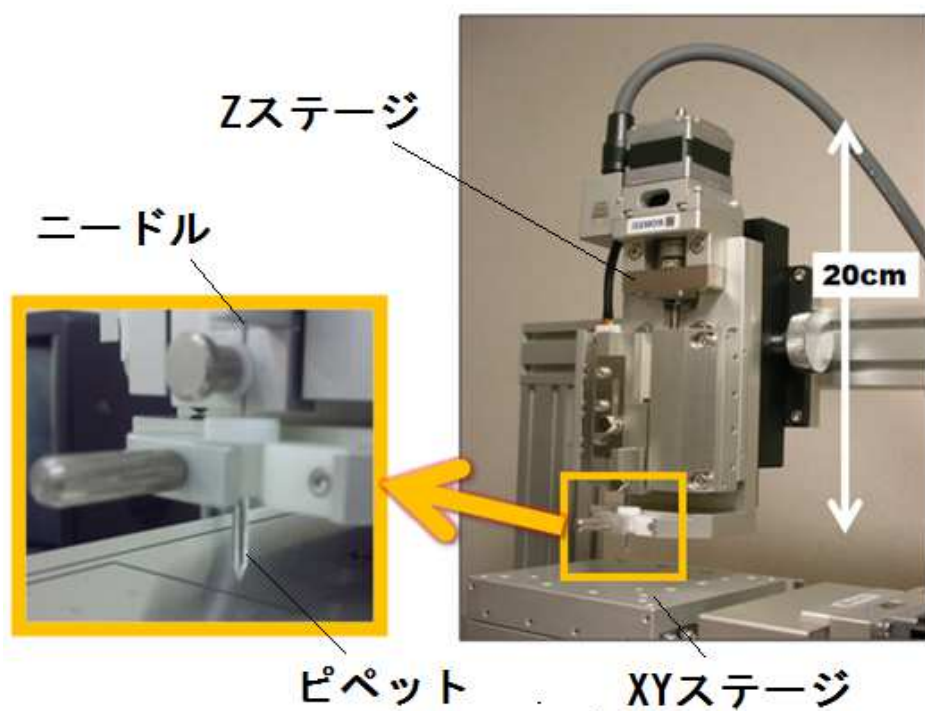


図 3-5 ニードル式液滴塗布装置（出典：株式会社アプライド・マイクロシステム）

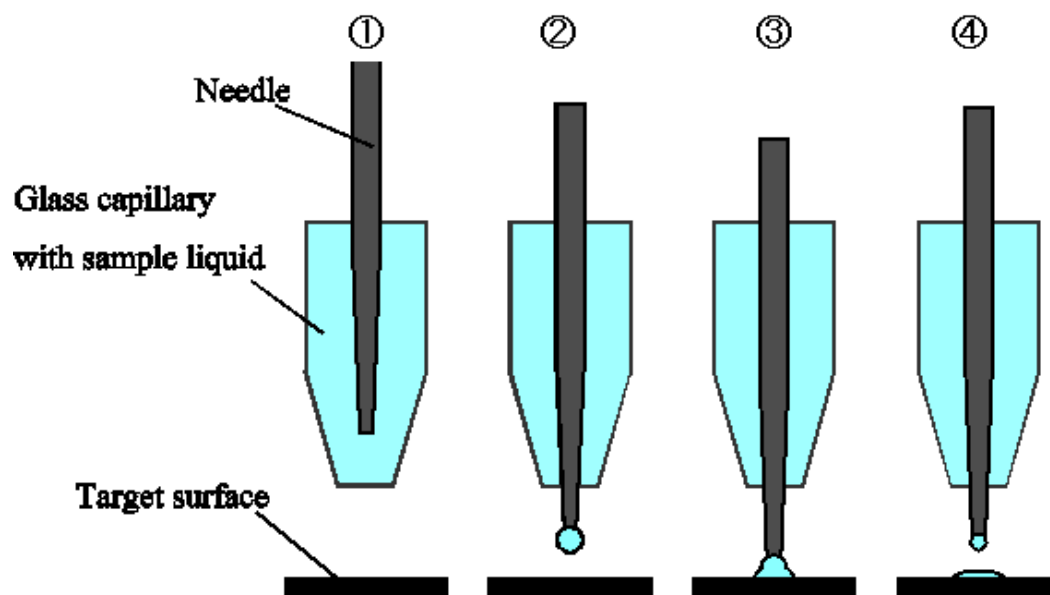


図 3-6 塗布原理

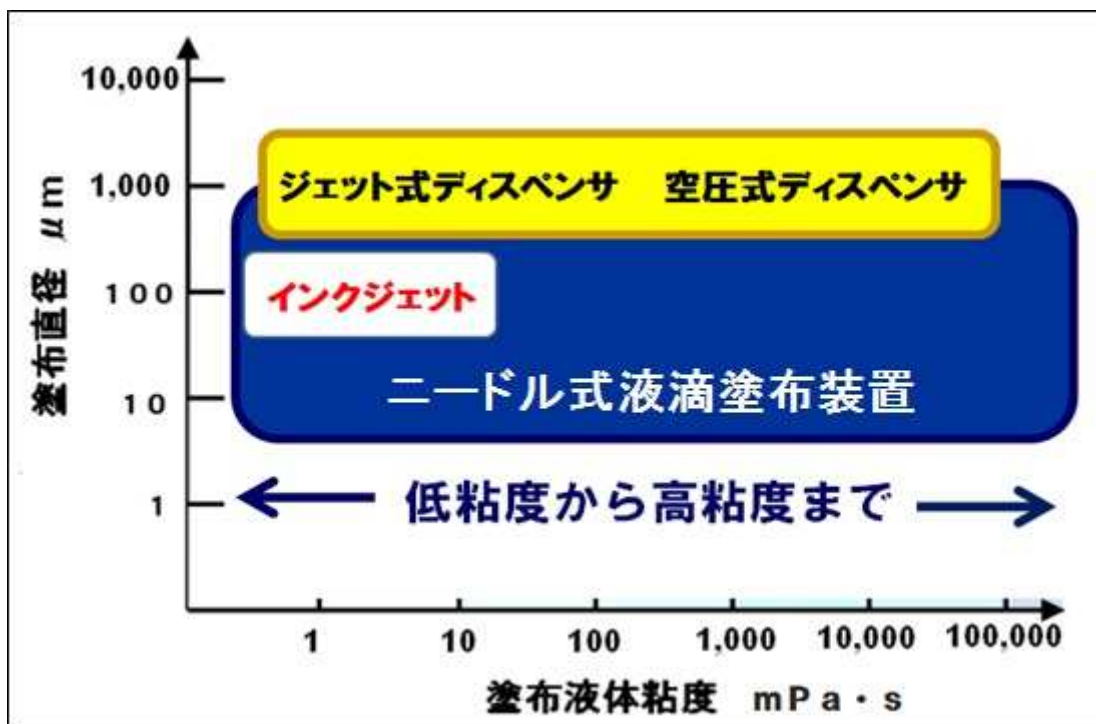


図 3-7 各液滴塗布方式における試料液体の粘度と塗布量の関係（出典：株式会社アプライド・マイクロシステム）

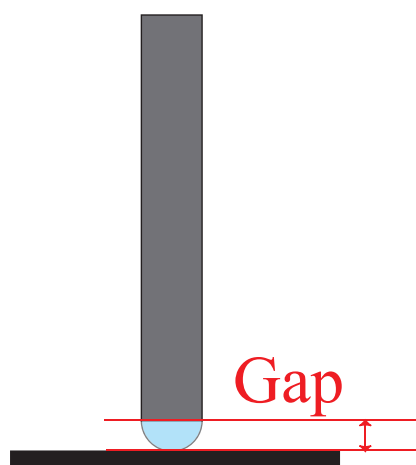


図 3-8 塗布ギャップ

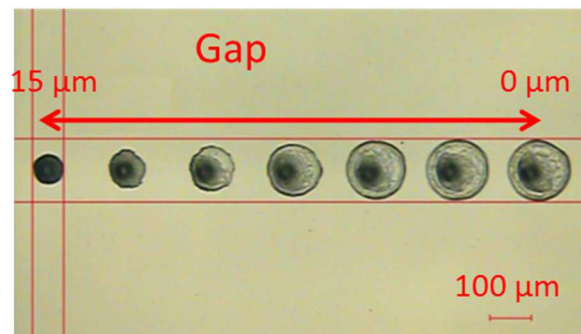


図 3-9 塗布ギャップによる直径ばらつき

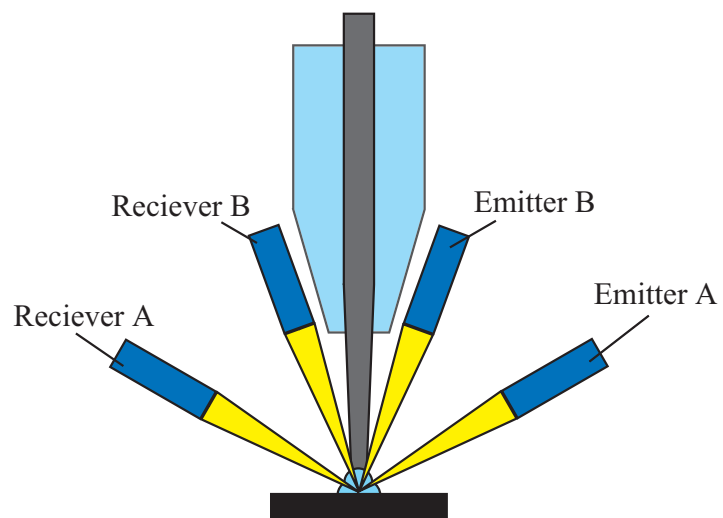


図 3-10 光学的塗布ギャップ調整機構

3.3 ニードル振動特性変化を用いた液滴と塗布面との接触検知の原理

図 3-11 にニードル振動特性変化を用いた液滴と塗布面との接触検知の原理を示す。圧電素子には板ばねが接続されており、板ばねにはニードルが接続されている。ニードルは液体の充填されたピペット内に下されている。圧電素子と板ばねを用いてニードルに微小振動を与える。ニードルの変位は式(3.1)に示すような、ばね-質量-ダンパ系の振動で表すことができる[3-12,13]。

$$k(x-y) = m_0 \frac{d^2 y}{dt^2} + 2\zeta_0 \sqrt{m_0 k} \frac{dy}{dt} \quad (3.1)$$

ここで、 x 、 y は、圧電素子およびニードルの変位、 m_0 は板ばねの等価質量を含んだニードルの質量、 k は板ばねのばね定数、 ζ_0 は振動機構の減衰定数である。式(3.1)をラプラス変換とたたみ込みの定理を用いて解くと[3-14]、ニードルの変位は式(3.2)のように表すことができる。

$$y = \sqrt{\frac{k}{m_0(1-\zeta_0^2)}} \exp\left(-\zeta_0 \sqrt{\frac{k}{m_0}} t\right) \cdot \sin\left\{\sqrt{\left(1-\zeta_0^2\right) \frac{k}{m_0}} t\right\} * x \quad (3.2)$$

なお、圧電素子の変位 x は、 $x = \sin\omega t$ のような正弦波である。式(3.2)より、振動系の共振周波数 f_0 は次式(3.3)となる。

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\left(1-\zeta_0^2\right) \frac{k}{m_0}} \quad (3.3)$$

ニードル先端に液滴が付着したとき、振動系の質量は、ニードルの質量 m_0 に液滴の質量 m_d が加わる。逆に、ニードル先端の液滴が塗布面に接触したとき、振動系の質量は、ニードルの質量 m_0 のみとなる。また、液体の粘性抵抗が増加するため、振動機構の減衰定数 ζ_0 に液体の粘性による減衰定数 ζ_d が加わる。ゆえに、液滴が塗布面に接触・非接触したときに、振動系の共振周波数は変化する。これは、水晶振動微量天秤法（Quartz Crystal Microbalance: QCM）と同様の原理である。QCM とは水晶振動子の共振周波数変化からナノグラムオーダーの質量変化を測定する方法である[3-15]。ニードル先端に付着した液滴が半球状と仮定すると、振動特性が変化した瞬間の塗布ギャップは、液滴の半径と等しくなる。よって、ニードル振動特性変化を用いることで、一定の塗布ギャップで液滴塗布を行うことができる。

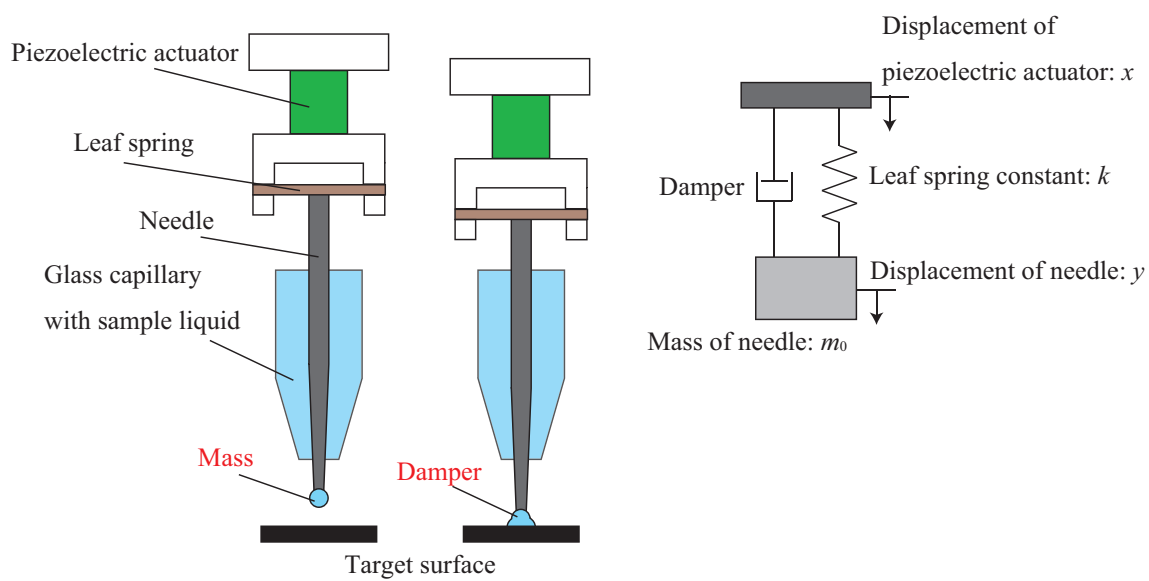


図 3-11 ニードル振動特性変化を用いた液滴と塗布面との接触検知の原理

3.4 ニードル振動特性の数値計算シミュレーション

3.3 に上述した原理を用いて、ニードル先端の液滴と塗布面が接触・非接触した際のニードル振動特性変化を数値計算シミュレーションにより求めた。シミュレーションには、数値解析ソフトウェア MATLAB を使用した。シミュレーションに用いたパラメータは以下の通りである。タングステンニードルの直径は 500 μm 、全長は 50 mm、質量は 68 mg とした。ニードル先端に付着する液滴は図 3-12 のような状態であると仮定した。図 3-12 より、ニードル先端の液滴の直径は 700 μm 、体積は 81.4 nL とした。液滴を密度 0.92 g/cm³ のシリコーングリスと仮定すると、液滴の質量は 74.9 ng となった。板ばねのばね定数は 9.62×10^{-4} N/m とした。

ここで、液体の粘性による減衰定数 ζ_d の導出方法について以下に述べる。振動式粘度計の測定原理より、液体から振動子が受ける機械的インピーダンス R_z は、

$$R_z = A\sqrt{\pi f \eta \rho} \quad (3.4)$$

となる。ここで f は駆動周波数、 A は液体中で振動する部分の面積、 η は液体の粘度、 ρ は液体の密度である[3-16]。式(3.1)における機械的インピーダンス R_z は、 ζ_0 を ζ_d に置き換えると、

$$R_z = 2\zeta_d \sqrt{m_0 k} \quad (3.5)$$

と表すことができる[19]。式(2.4)、式(2.5)より、液体の粘性による減衰定数 ζ_d は、

$$\zeta_d = \frac{A}{2} \sqrt{\frac{\pi f \eta \rho}{m_0 k}} \quad (3.6)$$

と表すことができる。

本シミュレーションでは、ニードル先端の液滴が塗布面と接触しているときは、ニードル先端の液滴は振動していないと仮定した。圧電素子の peak-to-peak の振動振幅を 0.16 μm とした。ニードルの変位は、圧電素子の変位を用いて正規化した。また、振動系の質量は、ニードルの質量のみであると仮定した。振動機構の減衰定数 ζ_0 は、0.0316、0.01、0.00316 の 3 種類に設定し、シミュレーションを行った。液滴の粘度は、10,000 mPas、31,600 mPas、100,000 mPas の 3 種類に設定し、シミュレーションを行った。

シミュレーション結果によるニードル変位の周波数特性を図 3-13、図 3-14、図 3-15 に示す。また各シミュレーション結果による、共振周波数を表 3.1 に示す。図 3-13、3-14、3-15 より、共振周波数付近において、液体の粘度の影響により、ニードルの変位が減少したことがわかる。また、液滴の質量変化と粘度の影響により、共振周波数が変化した。

以上より、ニードル振動を用いることで、液滴と塗布面との接触検知が可能であることが確認された。

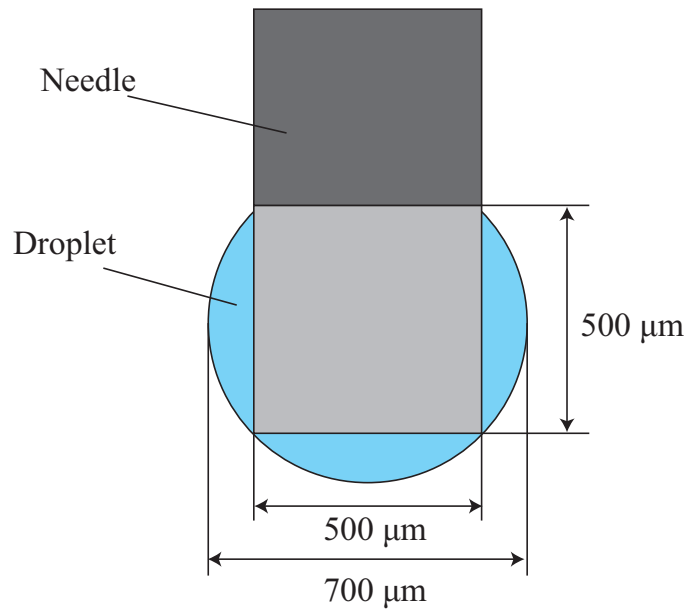
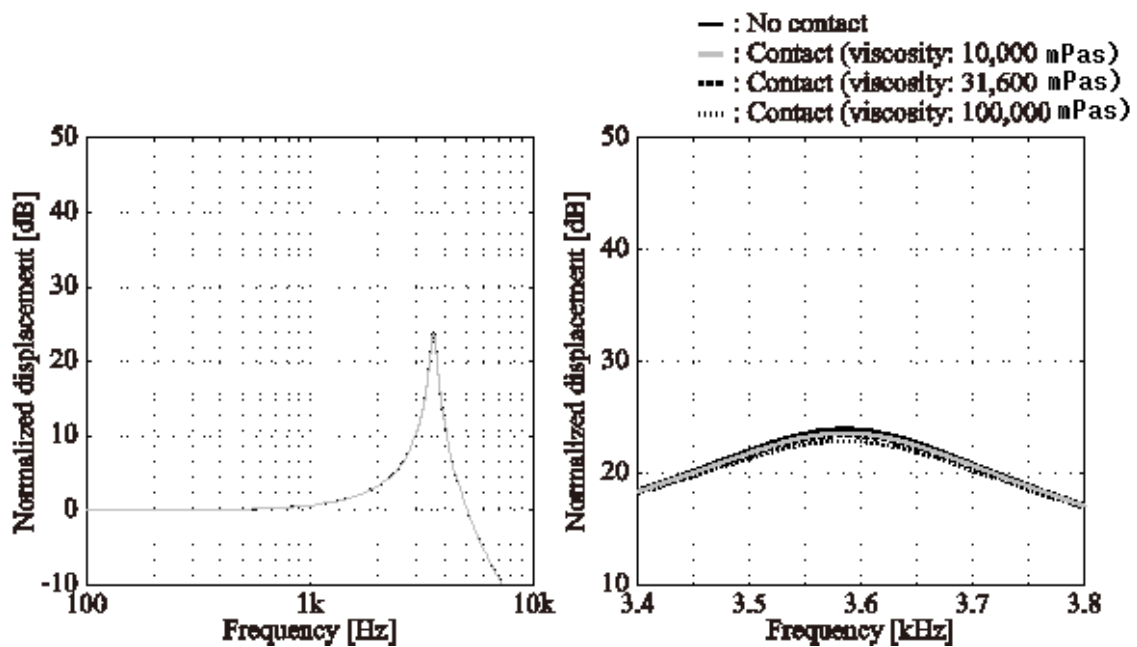


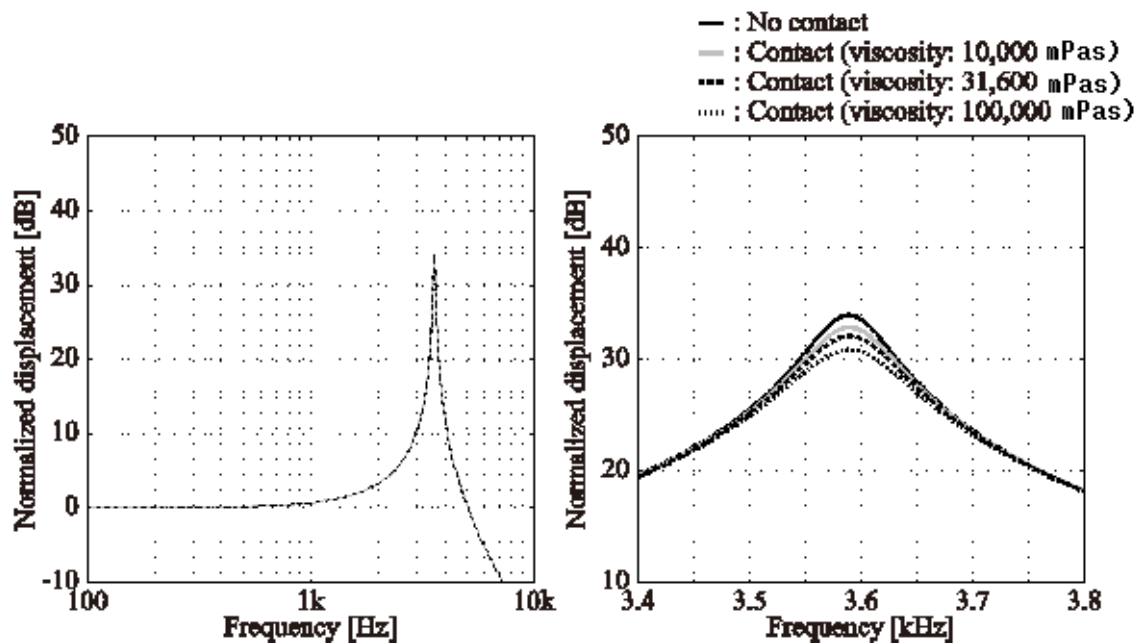
図 3-12 ニードル先端の液滴のモデル化



(a) ニードル振動変位の周波数特性

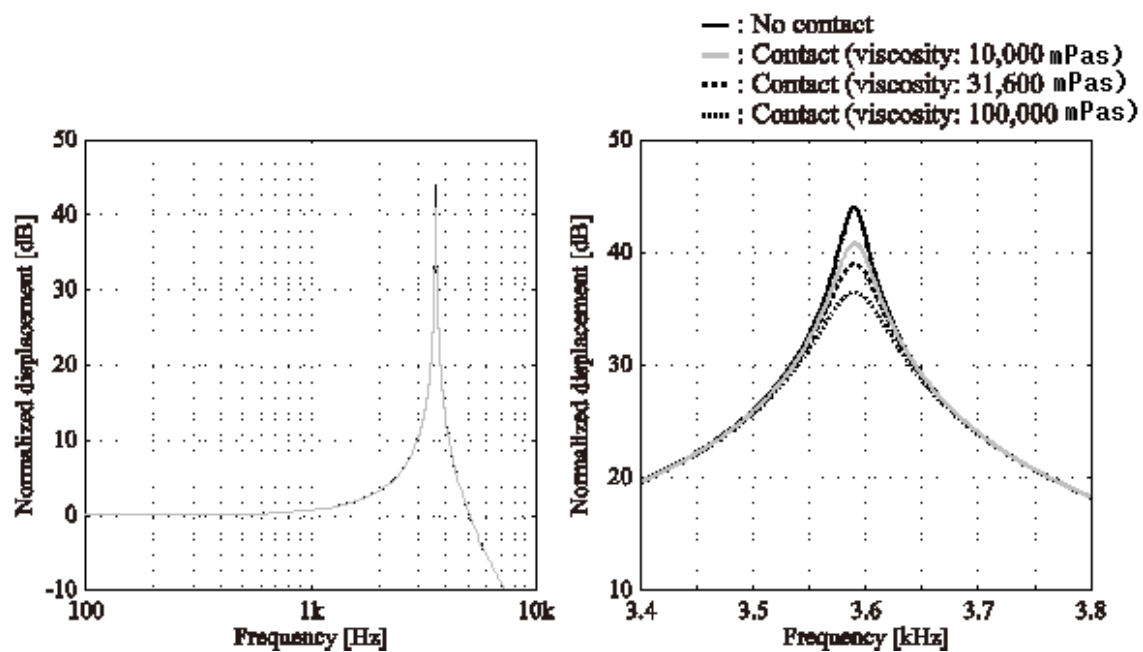
(b) 共振周波数周辺の周波数特性

図 3-13 減衰定数 $\zeta_0=0.0316$ におけるシミュレーション結果



(a) ニードル振動変位の周波数特性 (b) 共振周波数周辺の周波数特性

図 3-14 減衰定数 $\zeta_0=0.01$ におけるシミュレーション結果



(a) ニードル振動変位の周波数特性 (b) 共振周波数周辺の周波数特性

図 3-15 減衰定数 $\zeta_0=0.00316$ におけるシミュレーション結果

表 3.1 シミュレーション結果による共振周波数

ニードル先端の状態	液体の粘度 [mPas] (ζ_d)	共振周波数 [Hz]		
		ζ_0 : 0.0316	ζ_0 : 0.01	ζ_0 : 0.00316
液滴なし	-	3586.4	3589.6	3589.9
液滴が非接触	-	3585.6	3588.9	3589.2
液滴が塗布面に接触	10,000 (0.13)	3586.0	3589.5	3589.9
	31,600 (0.23)	3585.6	3589.3	3589.8
	100,000 (0.40)	3585.0	3589.1	3589.7

3.5 ニードル振動特性変化を用いた液滴と塗布面との接触検知機構の試作

図 3-16 に試作したニードル振動特性変化を用いた液滴と塗布面との接触検知機構を示す。本機構は圧電素子に接続された真鍮製ホルダー、ホルダーに取り付けられた板ばね（りん青銅、厚さ 0.5mm）、板ばねに接続されたニードル（直径 300 μ m、長さ 50mm）から構成される。板ばねの形状を図 3-17 に示す。板ばねの両面には 4 枚のひずみゲージ（KYOWA、KFG-2-120-C1-16 L30C2R）を貼り、ニードルの変位を計測できるようにした。

図 3-18 に本接触検知システムの構成図を示す。ファンクション・ジェネレータ（Tektronix、AFG3022B）で波形を生成し、アンプ（NF、BA4825）で増幅した入力波形を圧電素子に印加した。このときのニードル振動変位は、板ばねに貼りつけた 4 枚のひずみゲージによって計測される。4 枚のひずみゲージはホイートストンブリッジ回路に 4 ゲージ法で接続した。ブリッジ回路は、ブリッジボックス（KYOWA、DB-120A）を使用した。ブリッジボックスを動ひずみ測定器（KYOWA、DPM713-B）に接続し、動ひずみ測定器の信号をオシロスコープ（Tektronix、TDS2004B）で計測した。

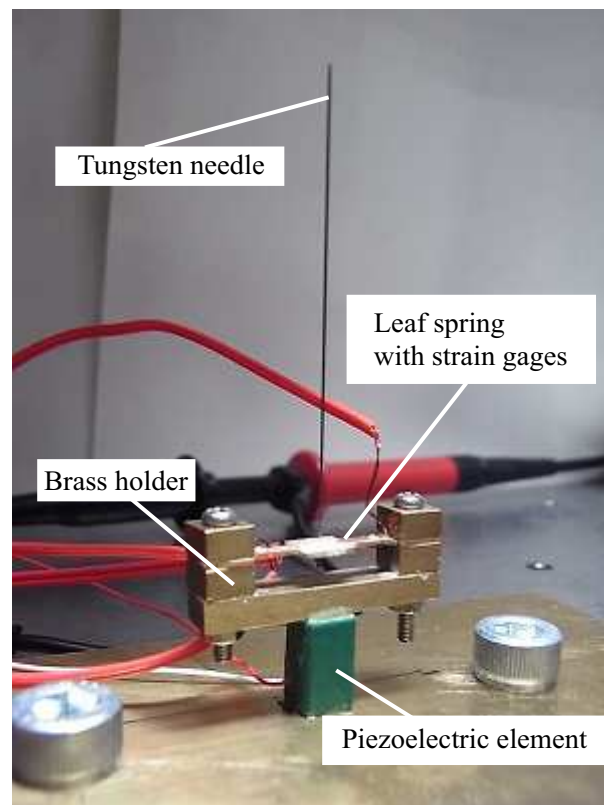


図 3-16 ニードル振動特性変化を用いた液滴と塗布面との接触検知機構

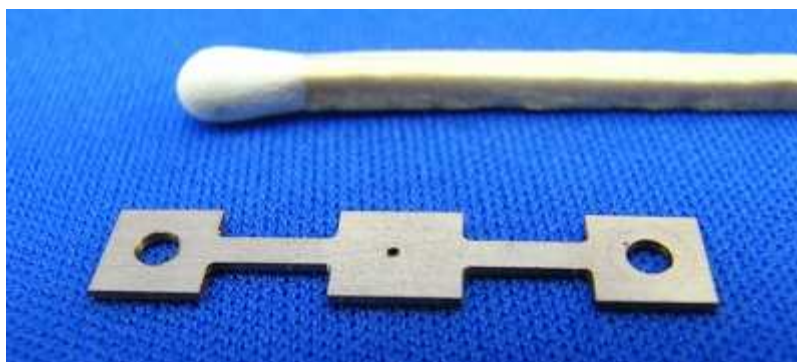


図 3-17 試作した板ばね

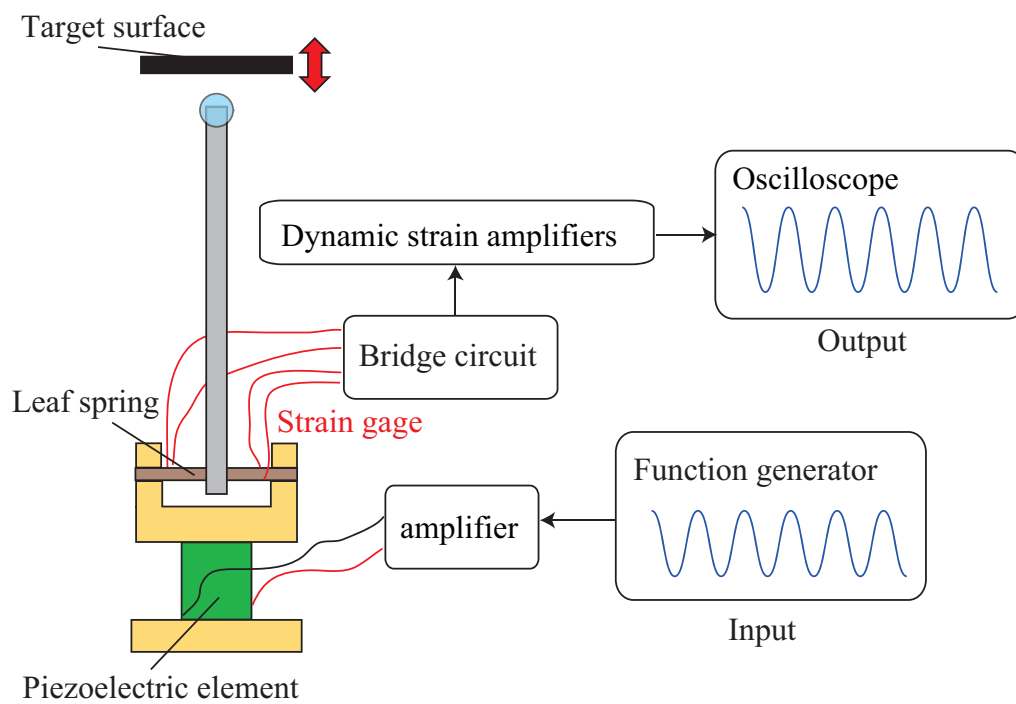


図 3-18 接触検知システム構成

3.6 校正方法

本計測システムでは、圧電素子に電圧を印加することで、板ばねに貼りつけられたひずみゲージの出力電圧を測定することができる。ただし、入力と出力は電圧で扱われるので、圧電素子やニードルの変位を直接測定することはできない。そこで、圧電素子、ひずみゲージの電圧と変位の関係を求めるために校正を行った。

まず、圧電素子の校正について述べる。図 3-19 のように静電容量型変位計（ADE MicroSense、3946-A02）を使用し、圧電素子の変位を測定した。図 3-20 に圧電素子の印加電圧と変位の関係を示す。図 3-20 の結果より、線形近似曲線を求めた。線形近似曲線より、圧電素子の印加電圧 V_p と変位 x_p の校正結果は、

$$x_p[\mu\text{m}] = 0.0728V_p[\text{V}] \quad (3.7)$$

となった。

次に、ひずみゲージの校正について述べる。図 3-21(a)のように、マイクロメータヘッド（Mitsutoyo、148-215 MHT3-5）で板ばねの中心を押し、そのときの変位を図 3-21 (b)のようにレーザ変位計（KEYENCE、LK-G30）で測定した。レーザ変位計の測定原理を図 3-22 に示す。レーザ変位計は発光素子と受光素子から構成され、対象物から反射されたレーザ光が受光素子上に照射される。対象物との距離が変化すると、受光素子上の照射位置が変化し、その位置の変化から距離を測定できる。ひずみゲージの出力電圧をオシロスコープで測定した。図 3-23 に板ばねの変位とひずみゲージの出力電圧の関係を示す。この結果より、線形近似曲線を求めた。線形近似曲線より、ひずみゲージの出力電圧 V_s と板ばねに結合されたニードルの変位 y_n の校正結果は、

$$y_n[\mu\text{m}] = 1.35V_s[\text{V}] + 0.3 \quad (3.8)$$

となった。

以降の実験結果では、この校正結果を適用している。

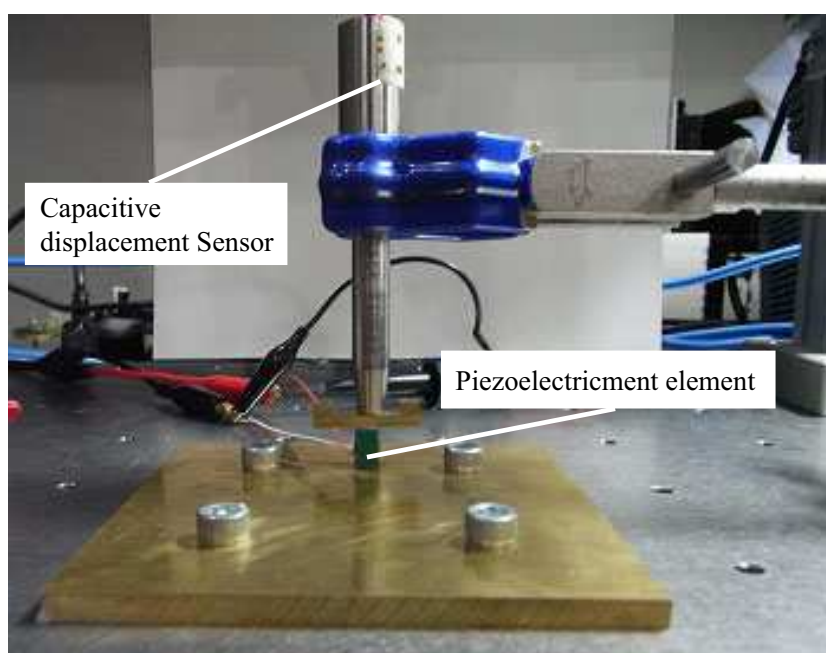


図 3-19 圧電素子の変位量校正方法

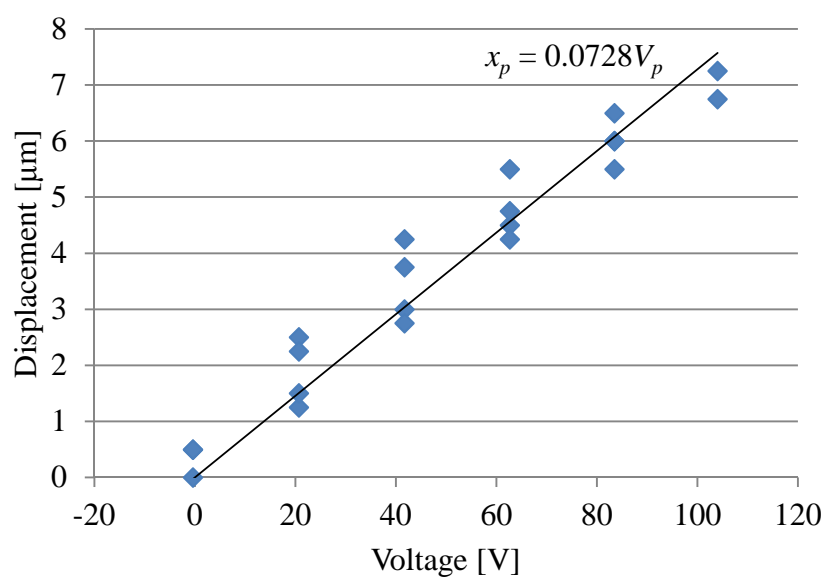
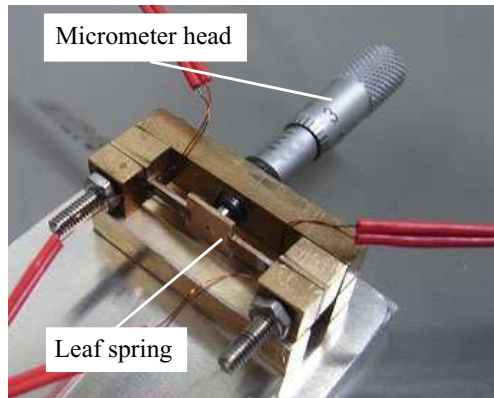
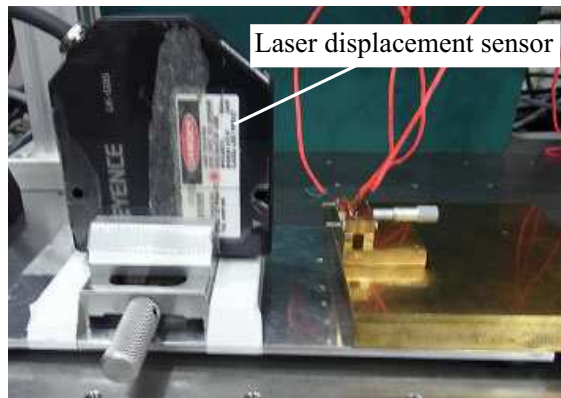


図 3-20 圧電素子の変位量の校正結果



(a) マイクロメータヘッドと板ばね



(b) レーザ変位計による校正

図 3-21 板ばねの変位量校正方法

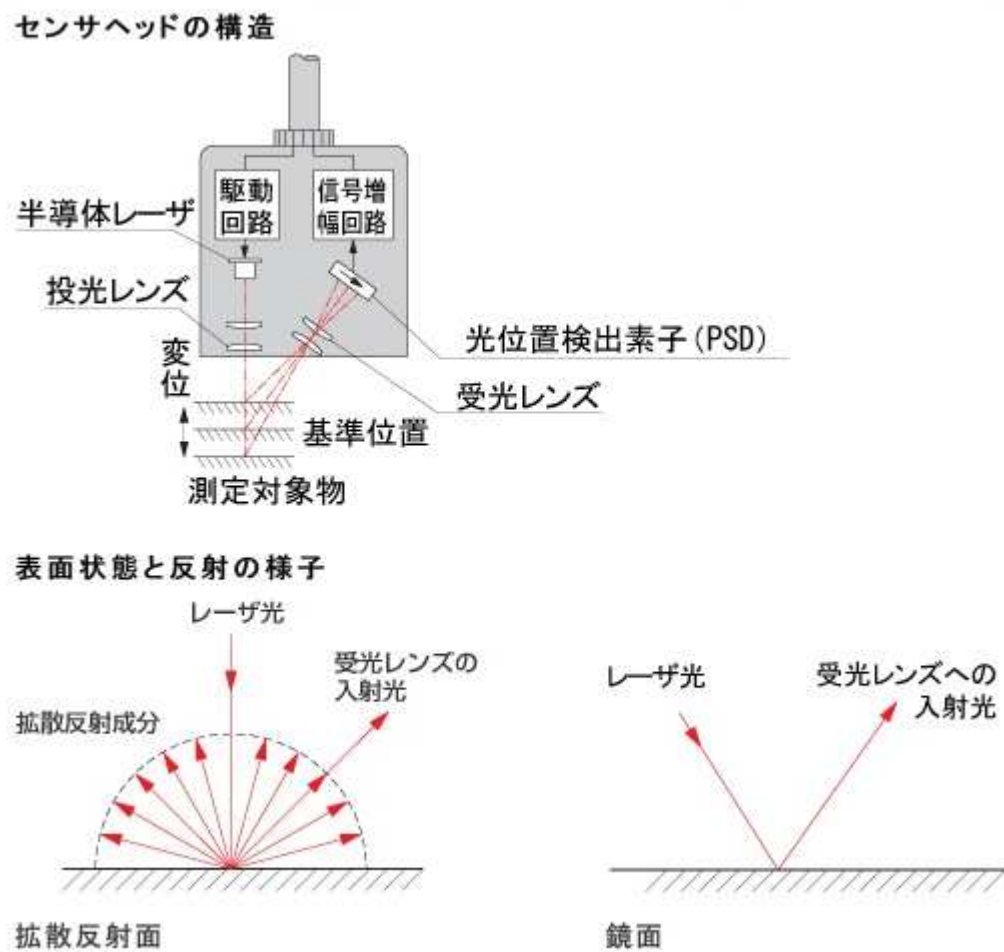


図 3-22 レーザ変位計の測定原理

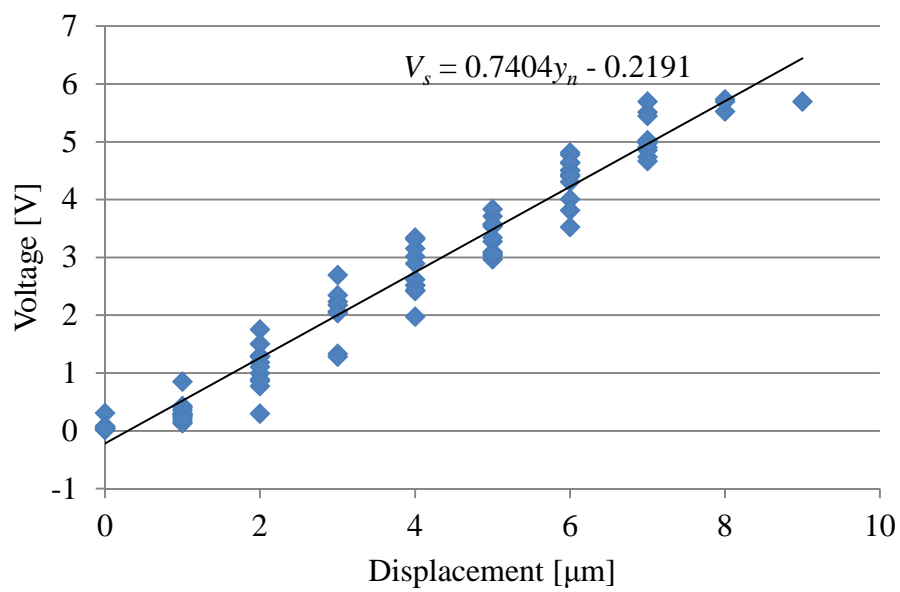


図 3-23 板ばねの変位量校正結果

3.7 液滴と塗布面との接触・非接触における周波数特性の変化

試作したニードル振動機構の周波数特性を測定した。まず、ニードル振動機構に液滴を付着せずに周波数特性の測定を行った。次に図 3-24(a)のようにニードル先端に液滴を付着させた状態で測定を行った。液体はシリコングリス (Shin-Etsu、G501) を使用した。粘度は 65,000 mPas である。その後、図 3-24(b)のように、液滴と塗布面を接触させた状態で測定を行った。塗布面の材質には ABS を使用した。なお圧電素子の駆動波形は sin 波、駆動電圧は 2.3 V_{p-p} である。測定結果を図 3-25 に示す。なお、ニードルの変位 y_n は圧電素子の変位 x_p を用いて正規化した。正規化したニードルの変位 G_n は、

$$G_n = 20 \log_{10} \frac{y_n}{x_p} [\text{dB}] \quad (3.9)$$

と表すことができる[3-17]。また各測定における圧電素子の振動振幅、ニードルの振動振幅、共振周波数、Q 値、減衰定数を表 3.2 に示す。Q 値 Q と減衰定数 ζ_0 は、式(3.10)、式(3.11)を用いて求めた。

$$Q = \frac{f_0}{f_2 - f_1} \quad (3.10)$$

ここで、 f_0 は共振周波数、 f_1 は共振ピークの左側において振動エネルギーが共振ピークの半値となる周波数、 f_2 は共振ピークの右側において振動エネルギーが共振ピークの半値となる周波数である。なお、振動エネルギーが共振ピークの半値となる値とは、最大振幅の $1/\sqrt{2}$ 倍の振幅値である。また Q 値は 1 自由度のばね-質量系では、式(3.6) の ζ_d を ζ_0 に置き換えて用いると、

$$Q = \frac{\sqrt{m_0 k}}{R_z} = \frac{1}{2\zeta_0} \quad (3.11)$$

と表すことができる。図 3-25 及び表 3.2 より、ニードル先端の液滴が塗布面に接触すると、共振周波数が増加した。また、液滴が塗布面に接触すると共振ピークでのニードル振動振幅は大きく減少した。これらの原因は液滴の粘性抵抗によるものである。以上より、試作したニードル振動を用いて液滴と塗布面との接触検知が可能であることが確認された。

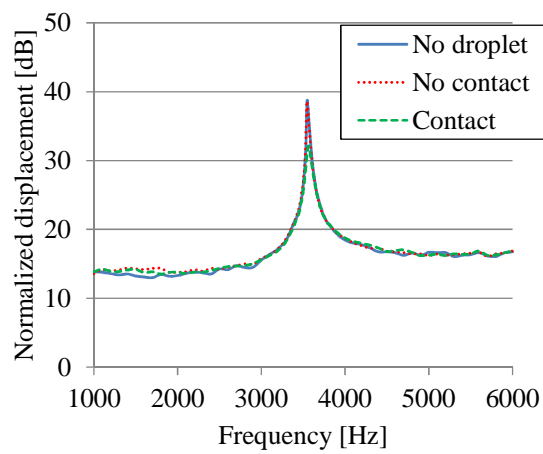


(a) 液滴が非接触

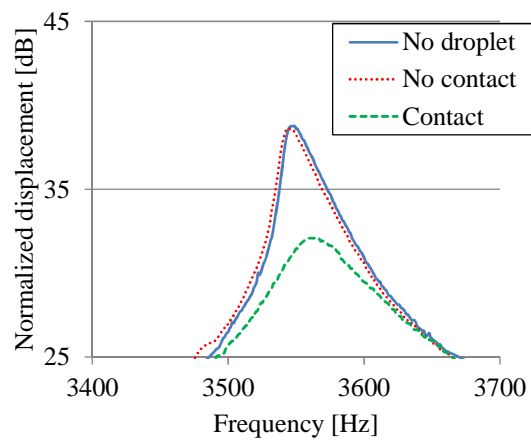


(b) 液滴が塗布面に接触

図 3-24 ニードル先端の液滴: 液滴は 65,000 cP のシリコングリス



(a) ニードル振動変位の周波数特性



(b) 共振周波数周辺の周波数特性

図 3-25 ニードル振動機構の周波数特性

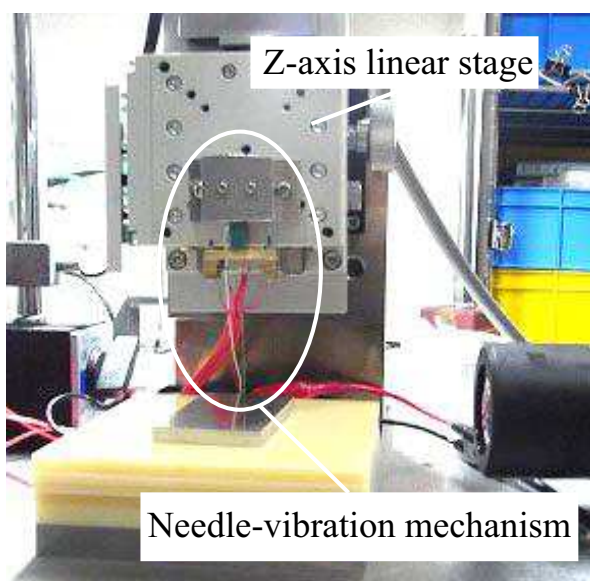
表 3.2 ニードル振動機構の周波数特性

液滴の状態	圧電素子の 振幅 [μm]		ニードル振幅の 最大値 [μm]	共振周波数 [Hz]	Q 値	減衰定数
液滴なし	0.085		7.32	3.548	122.34	0.0041
液滴付着	0.085		7.19	3.545	122.24	0.0041
液滴が塗布面 に接触	0.085		3.41	3.564	53.2	0.0094

3.8 ステージ式ニードル振動機構の試作

塗布ギャップの変化によるニードル振動特性変化を測定するために、図 3-26 のようにニードル振動機構を自動 Z ステージ（KOHZU、XA07A-R1）に取り付けたステージ式ニードル振動機構を試作した。ニードルは直径 0.5 mm、全長 50 mm である。

計測システム概略図を図 3-27 に示す。ニードル先端の液滴の状態を観測するために、デジタルマイクロスコープ（KEYENCE、コントローラー：VHX-900、レンズ：VH-Z50L）を使用した。また、自動 Z ステージを駆動するために、モータコントローラ（KOHZU、SC-410）を介して、PC 上の動作プログラムより操作した。動作プログラムは、Microsoft Visual Basic で製作した。



(a) 全体図



(b) 拡大図

図 3-26 試作したステージ式ニードル振動機構

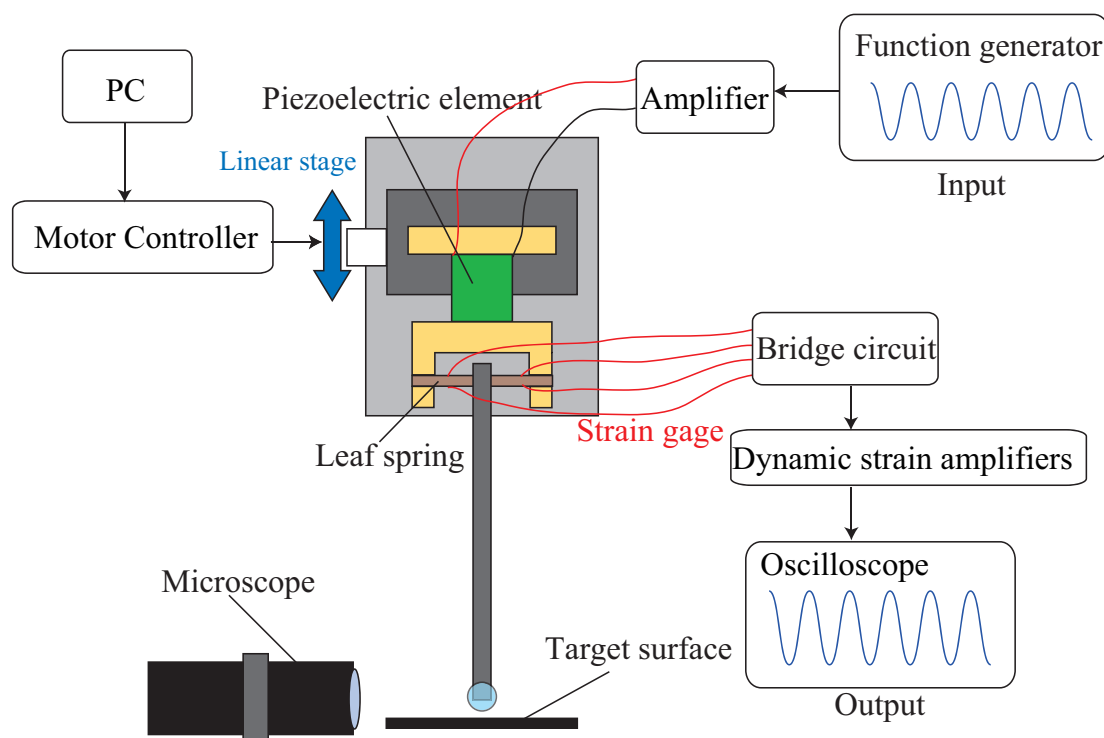


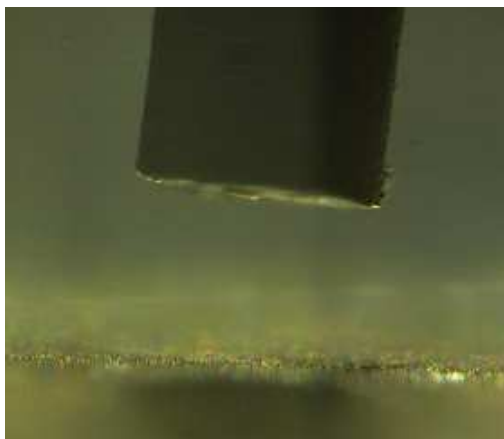
図 3-27 ステージ式ニードル振動機構の計測システム

3.9 塗布ギャップの違いによる周波数特性の測定

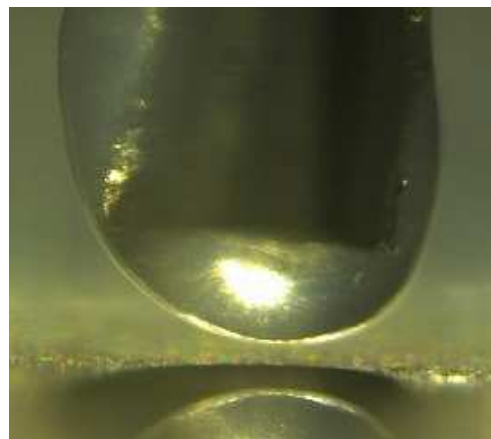
試作したステージ式ニードル振動機構を用いて、塗布ギャップの違いによる周波数特性を測定した。図 3-28 において、(a)ニードルに液滴が付着していないとき、(b)ニードル先端に付着した液滴が塗布面と非接触のとき、(c)塗布ギャップが 200 μm のとき、(d)100 μm のとき、(e)5 μm のときにおける周波数特性を測定した。圧電素子に 2.5V_{p-p} を印加した。ニードル先端の液滴には、粘度 65,000 mPas のシリコンオイル（Shin-Etsu、KS-650N）を使用した。塗布面にはアルミ板を使用した。

測定結果を図 3-29 に示す。各測定結果の圧電素子の振動振幅、ニードル振動振幅の最大値、共振周波数、Q 値、減衰定数を表 3.3 に示す。塗布ギャップが小さくなるにつれて、共振周波数が増加した。これは、塗布ギャップが小さくなるにつれて、塗布ギャップ内の液体のばね性が増大したためだと考えられる。すなわち、振動系全体のばね定数 k が増加することで共振周波数が増加したといえる。また、塗布ギャップが小さくなるにつれて、ニードル振動振幅が大きく減少した。これは塗布ギャップが小さくなるにつれて、液体の粘性抵抗が増大したためである。

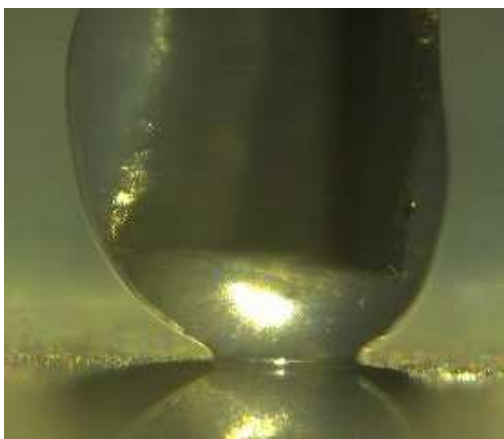
以上から、ニードル振動特性変化を用いることで、塗布ギャップの違いを検知することができることがわかった。



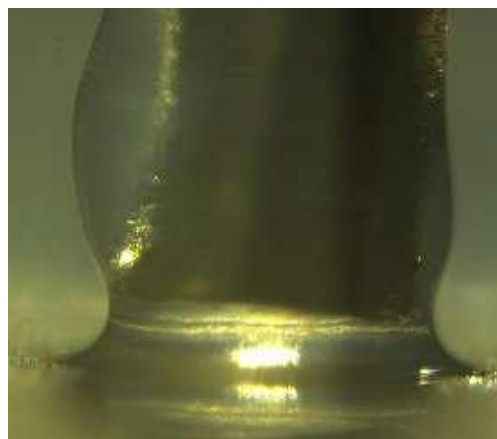
(a) 液滴なし



(b) 液滴が塗布面に非接触



(c) 塗布ギャップ : 200 μm

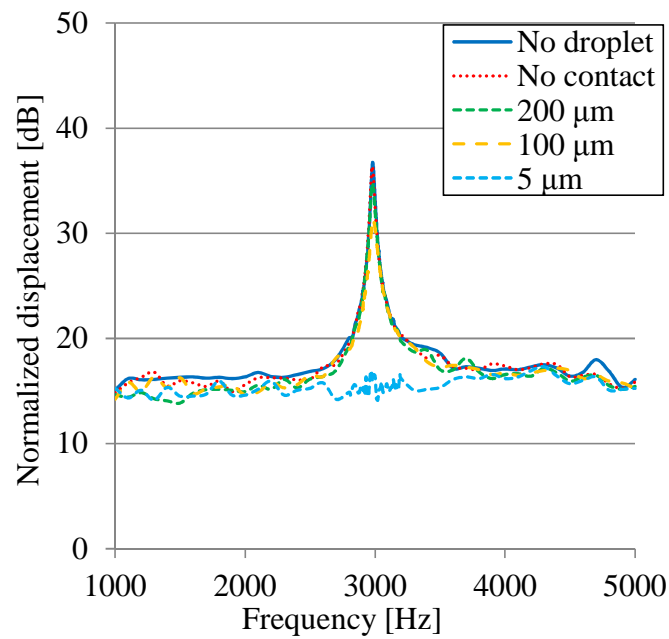


(d) 塗布ギャップ : 100 μm

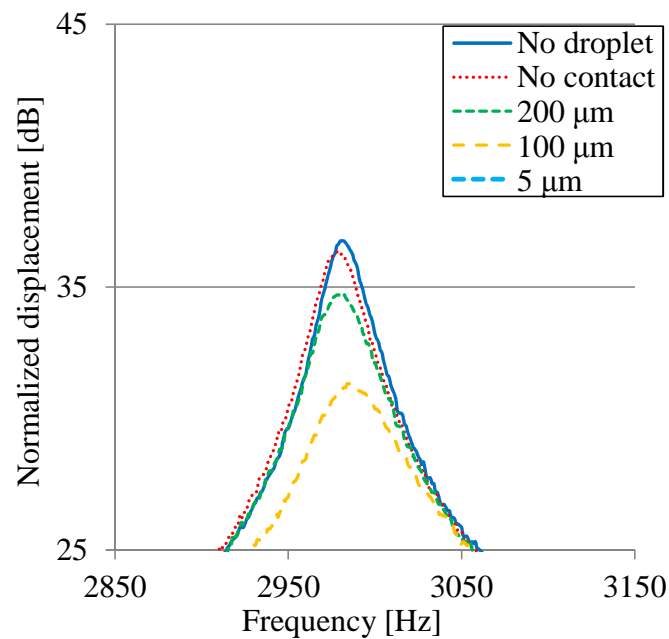


(e) 塗布ギャップ : 5 μm

図 3-28 塗布ギャップの違いによるニードル先端の液滴:
(シリコンオイル 65,000 mPas)



(a) ニードル振動変位の周波数特性



(b) 共振周波数周辺の周波数特性

図 3-29 塗布ギャップの違いによるステージ式ニードル振動機構の周波数特性

表 3.3 ステージ式ニードル振動機構の周波数特性

液滴の状態	圧電素子の 振幅 [μm]	ニードル振幅の 最大値 [μm]	共振周波数 [Hz]	Q 値	減衰定数
液滴なし	0.091	6.27	2981	102.79	0.0049
液滴付着	0.091	6.00	2979	90.27	0.0055
Gap: 200 μm	0.091	4.97	2981	74.53	0.0067
Gap: 100 μm	0.091	3.35	2986	53.32	0.0094

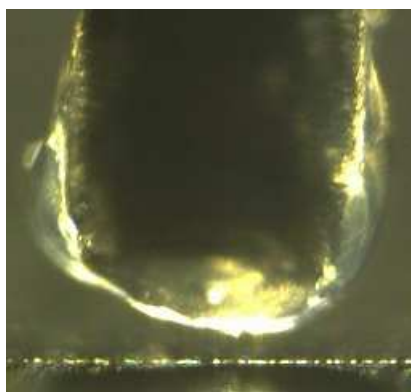
3.10 ニードル振動変位と塗布ギャップの関係

図 3-29 より、共振周波数周辺では、塗布ギャップの違いによって、ニードル振動変位の変化が顕著に表れた。そこで、ニードル振動変位と塗布ギャップの関係を測定した。

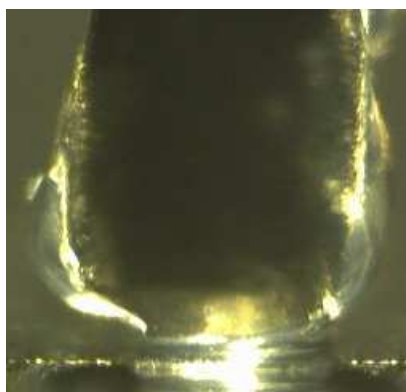
圧電素子の駆動周波数を 2808 Hz、駆動電圧を 2.3 V_{p-p}にした。液滴は粘度 65,000 mPas のシリコンオイルを使用した。塗布面にはアルミ板を使用した。自動 Z ステージを 5 μm ずつ下降させ、その都度ニードルの変位をプロットした。

図 3-30 に各塗布ギャップにおけるニードル先端の液滴を示す。図 3-31 に各塗布ギャップにおけるニードル振動変位の波形を示す。図 3-32 に塗布ギャップとニードル振動変位の関係を示す。塗布ギャップが減少するにつれて、ニードル振動変位が減少している。さらに、塗布ギャップ 160 μm から 25 μm の範囲において、塗布ギャップとニードル振動変位は比例関係になった。これは、液滴の粘性抵抗によるものである。式(3.6)より、液滴の粘性による減衰定数 ζ_d と液体中で振動する面積 A は比例関係にある。図 3-33 のように、塗布ギャップが小さくなるにつれて、ニードル先端の側面に付着する液滴の量が増えた。液体中で振動する面積 A とは、本実験では、ニードル先端が液滴と接触する面積と言い換えることができる。すなわち、塗布ギャップが小さくなるにつれて、ニードル先端が液滴と接触する面積 A は増加する。ゆえに、式(3.6)より、塗布ギャップが小さくなるにつれて、ニードル先端が液滴と接触する面積 A は増加し、液滴の粘性抵抗は増加する。

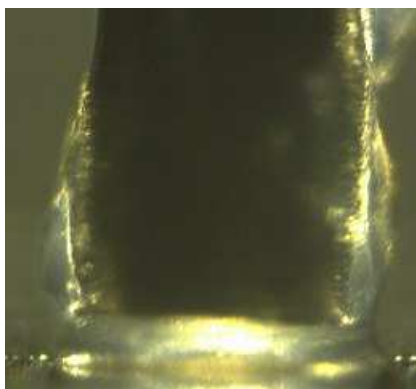
以上より、ニードル振動特性変化を用いることで、塗布ギャップを検知することが可能である。



(a) Gap: 230 μm 、非接触



(b) Gap: 160 μm

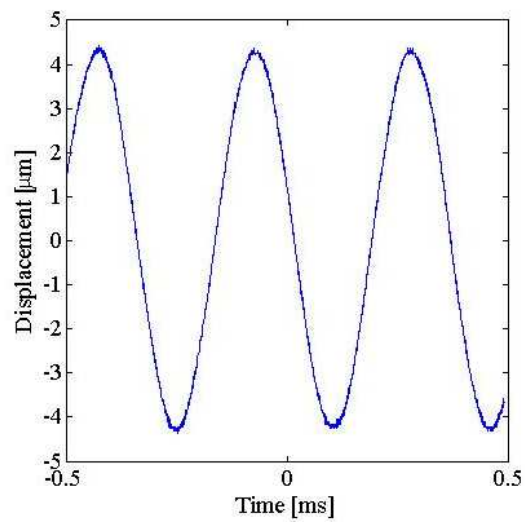


(c) Gap: 90 μm

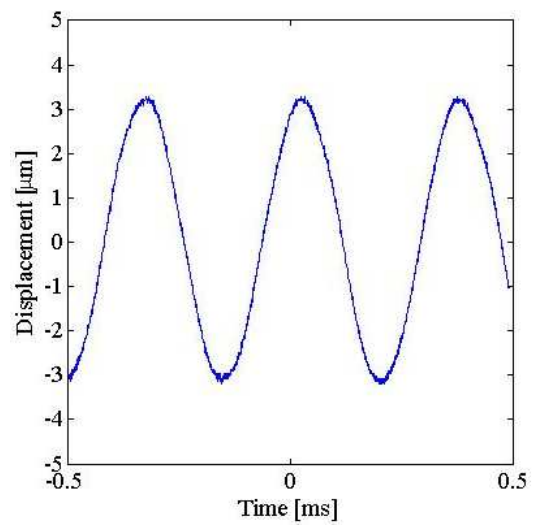


(d) Gap: 0 μm

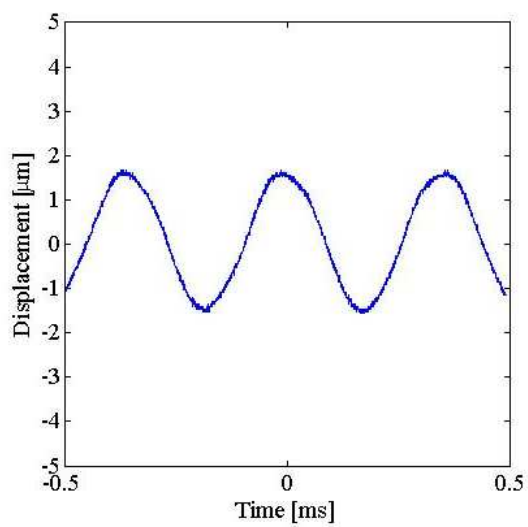
図 3-30 塗布ギャップの違いによるニードル先端の液滴:
シリコーンオイル 65,000 mPas



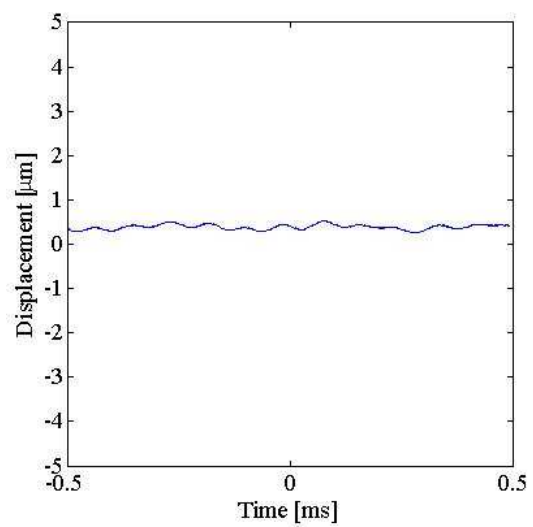
(a) Gap: 230 μm 、非接触



(b) Gap: 160 μm



(c) Gap: 90 μm



(d) Gap: 0 μm

図 3-31 塗布ギャップの違いによるニードル振動変位の波形

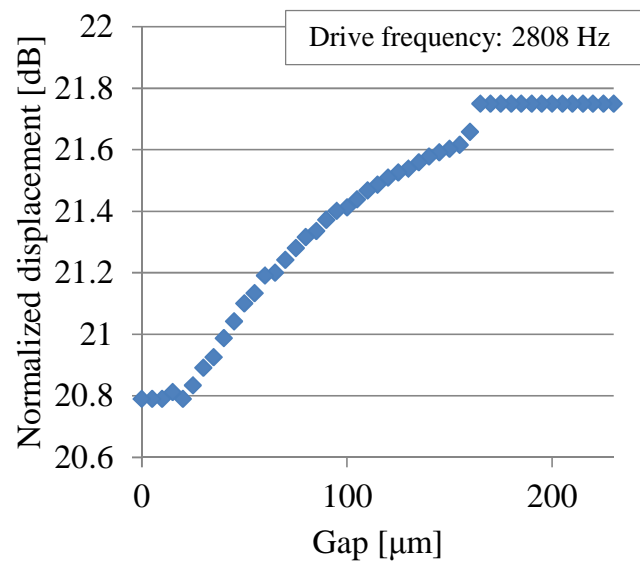


図 3-32 ニードル振動変位と塗布ギャップの関係

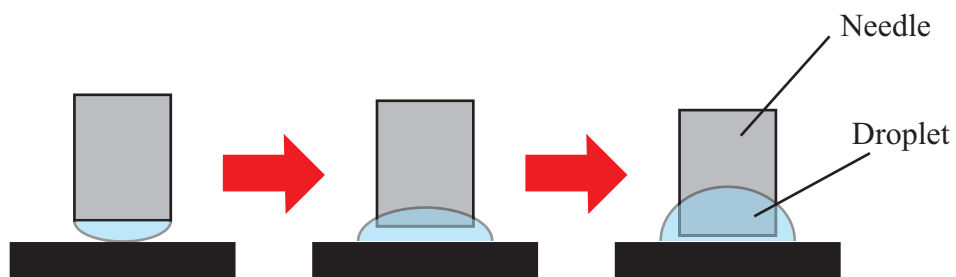
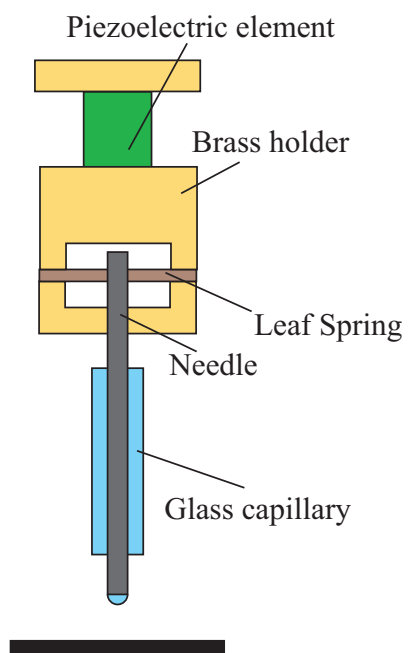


図 3-33 塗布ギャップの違いによるニードル先端の液滴の概略図

3.11 四角形ホルダー式ニードル振動機構による検知実験

ニードル式液滴塗布装置と同様の構成とするために、液だめを追加した四角形ホルダー式ニードル振動機構を試作した（図 3-34）。試作した四角形ホルダー式ニードル振動機構を用いて、圧電素子に $2\text{ V}_{\text{p-p}}$ を印加し、ニードル先端位置を図 3-35①の状態で行った。次に、圧電素子に $10\text{ V}_{\text{p-p}}$ を印加し、図 3-35 の④、⑤、⑥の状態で行った。試料液体には $5,000\text{ mPas}$ のシリコンオイル、塗布面にはスライドガラス、直径 $500\mu\text{m}$ ニードルを使用した。結果を図 3-36 に示す。表 3.4 に、図 3-36 における各測定結果の圧電素子の振動振幅、ニードル振動振幅の最大値、共振周波数、 Q 値、減衰定数を示す。ニードル先端の液滴が接触・非接触する状態の違いによって、共振ピーク時のニードル振動変位に違いが生じたことがわかった。



(a) 概略図



(b) 試作機

図 3-34 四角形ホルダー式ニードル振動機構

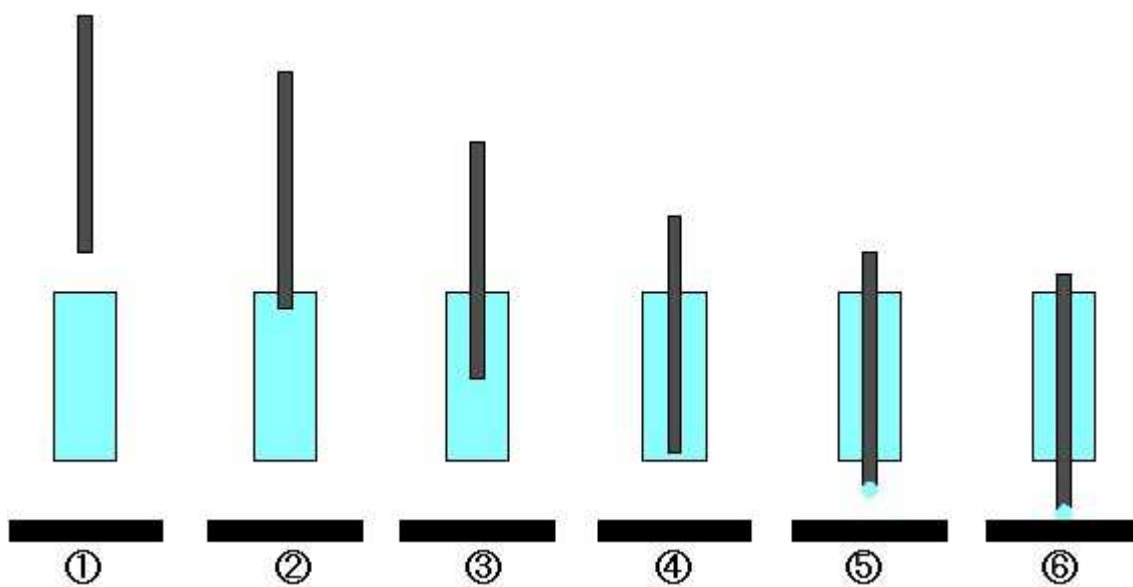
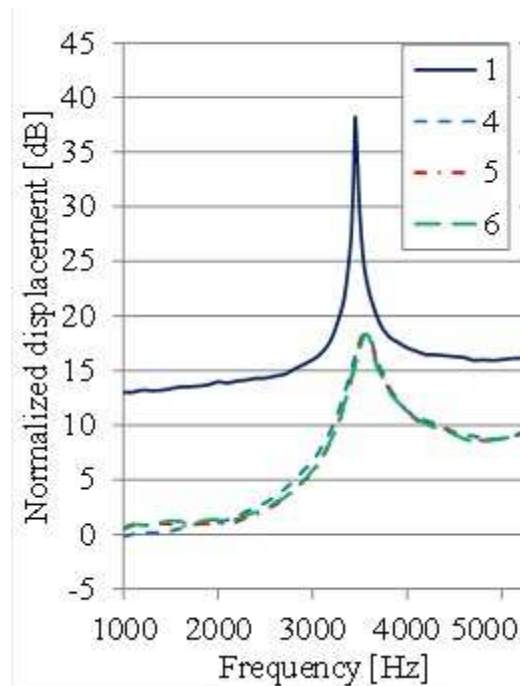
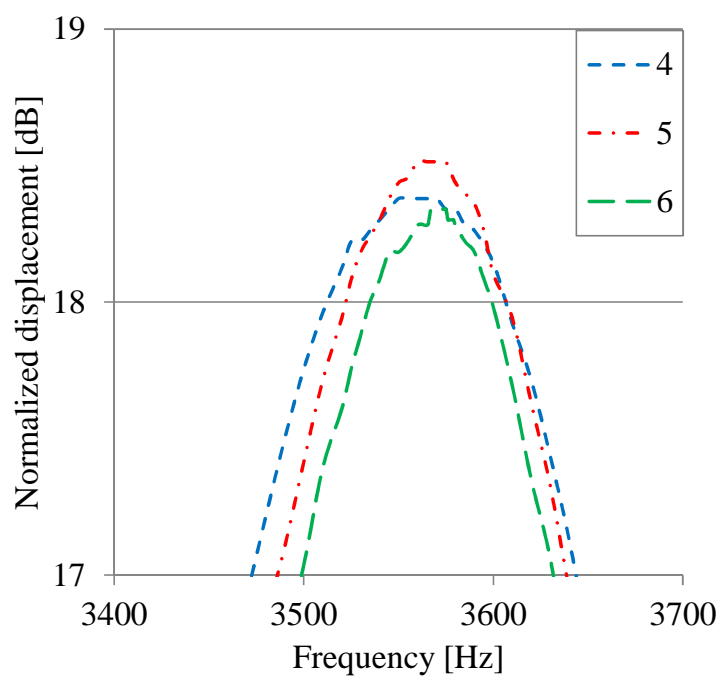


図 3-35 ニードル先端の位置の概略図



(a) ニードル振動変位の周波数特性



(b) 共振周波数周辺の周波数特性

図 3-36 ニードル先端の位置の違いによる
四角形ホルダー式ニードル振動機構の周波数特性

表 3.4 ニードル先端の位置の違いによる
四角形ホルダー式ニードル振動機構の周波数特性

ニードル先端 の状態	圧電素子の 振幅 [μm]	ニードル振幅の 最大値 [μm]	共振周波数 [Hz]	Q 値	減衰定数
①	0.073	5.93	3.451	123.25	0.0041
④	0.364	3.02	3.560	13.69	0.0365
⑤	0.364	3.07	3.570	16.23	0.0308
⑥	0.364	3.01	3.571	17.00	0.0294

3.12 粘度変化における接触検知実験（ニードル ϕ 500 μ m）

3.11 で試作した機構を用いて、液体粘度を変化させた場合の接触検知実験を行った。本実験では、液体は全てシリコーンオイルを使用した。液体の粘度は、100、500、1,000、5,000、10,000、30,000、50,000、100,000 mPas の 8 種類を使用した。ニードルは直径 500 μ m を使用した。ガラス管は、外径 2 mm、内径 0.8 mm、全長 10 mm のものを使用した。塗布面にはスライドガラスを使用した。ニードル先端の液滴が塗布面に接触する前の状態において、ひずみゲージの出力電圧が約 3 V_{p-p} になるように、圧電素子の印加電圧を調整した。各粘度におけるニードル先端の液滴の初期状態を図 3-37 に示す。

粘度 5,000mPas を用いた塗布ギャップの違いによるニードル先端の液滴を図 3-38 に示す。実験結果によるニードル振動変位と塗布ギャップの関係を図 3-39 に示す。また、各粘度における圧電素子の駆動周波数、振動振幅、ニードル先端の液滴が塗布面に接触する前のニードルの初期振動振幅、ファーストコンタクトの塗布ギャップを表 3.5 に示す。なお、ファーストコンタクトとは、ニードル先端の液滴が塗布面に初めて接触した瞬間と定義する。図 3-39 より 100 mPas ~100,000 mPas の範囲において、接触検知が可能であることがわかった。

以上より、ニードル振動を用いて、低粘度から高粘度までの液体を接触検知できることが確認された。



(a) 100 mPas



(b) 500 mPas



(c) 1,000 mPas



(d) 5,000 mPas



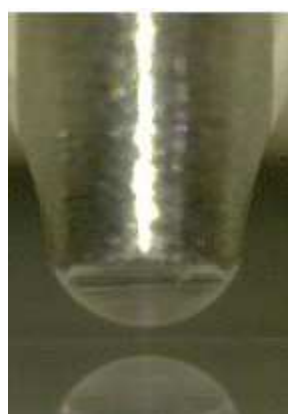
(e) 10,000 mPas



(f) 30,000 mPas



(g) 50,000 mPas



(h) 100,000 mPas

図 3-37 各粘度における $\phi 500\mu\text{m}$ ニードル先端の液滴の初期状態



(a) Gap: 215 μm 、非接触



(b) Gap: 190 μm



(c) Gap: 85 μm



(d) Gap: 55 μm



(e) Gap: 25 μm



(f) Gap: 15 μm



(g) Gap: 0 μm

図 3-38 塗布ギャップの違いによる $\phi 500\mu\text{m}$ ニードル先端の液滴:
試料液体はシリコンオイル 5,000 mPas

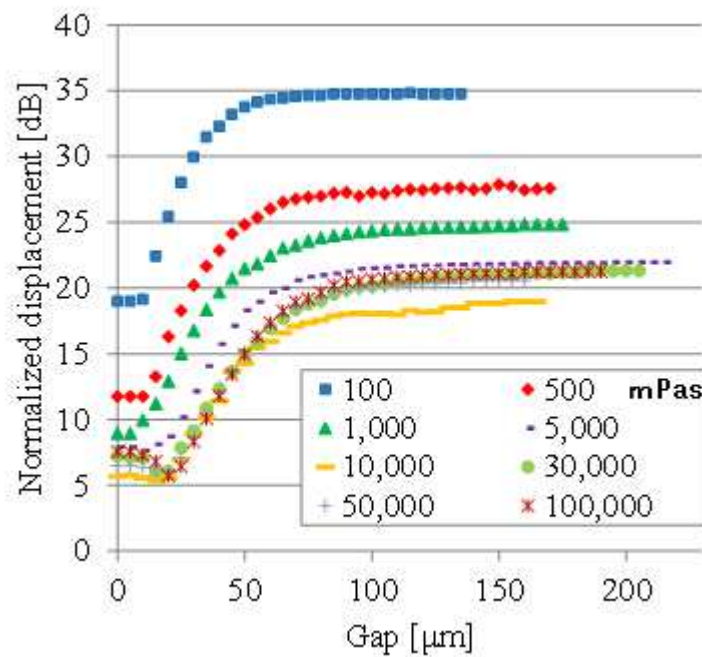


図 3-39 液体の粘度の違いによるニードル振動変位と塗布ギャップの関係

表 3.5 液体の粘度の違いによるニードル振動変位と塗布ギャップの関係

液体の粘度 [mPas]	圧電素子の駆 動周波数 [Hz]	圧電素子の振幅 [μm]	ニードルの初期 振動振幅 [μm]	ファーストコンタクト の塗布ギャップ [μm]
100	3490	0.044	2.386	80
500	3490	0.102	2.433	105
1,000	3530	0.138	2.413	155
5,000	3630	0.189	2.366	190
10,000	3630	0.262	2.318	135
30,000	3640	0.204	2.372	180
50,000	3710	0.226	2.406	135
100,000	3770	0.211	2.440	155

3.13 粘度変化における接触検知実験（ニードル ϕ 100 μ m）

これまでの実験では、主に先端直径 500 μ m のニードルを使用してきた。先端直径 500 μ m のニードルを用いる場合の液滴の体積は、nL オーダーである。pL オーダーの液滴を塗布するためには、先端直径 100 μ m 以下のニードルを使用する必要がある。そこで、先端直径 100 μ m のニードルを用いて、液滴が塗布面に接触・非接触の違いによる周波数特性の測定を行った。ニードル先端の液滴の状態を図 3-40 に示す。試料液体はシリコンオイル 30,000 mPas を使用した。塗布面の材質には、スライドガラスを使用した。ガラス管は、外径 2 mm、内径 0.8 mm、全長 5 mm のものを使用した。圧電素子には 4 V_{p-p} を印加した。

測定結果を図 3-41 に示す。また、表 3.6 に圧電素子の振動振幅、ニードル振動振幅の最大値、共振周波数、Q 値、減衰定数を示す。図 3-41 (b) 及び表 3.6 より、ニードル先端の液滴が塗布面と接触・非接触の違いによって、共振周波数が変化したことがわかる。また、共振ピークにおけるニードル振動変位も変化した。

以上より、ニードル先端直径が 100 μ m の場合でも、ニードル振動を用いた接触検知が可能であることがわかった。

そこでシリコンオイルの粘度を、100、1,000、10,000、30,000、100,000 mPas に変化させて実験を行った。ガラス管は、外径 2 mm、内径 0.8 mm、全長 5 mm のものを使用した。塗布面にはスライドガラスを使用した。ニードル先端の液滴が塗布面に接触する前の状態において、ひずみゲージの出力電圧が 1.5 V_{p-p}~1.8 V_{p-p} になるように、圧電素子の印加電圧を調整した。各粘度におけるニードル先端の液滴の初期状態を図 3-42 に示す。自動 Z ステージは 1 μ m ずつ下降させた。

塗布ギャップの違いによるニードル先端の液滴を図 3-43 に示す。実験結果を図 3-44 に示す。また、各粘度における圧電素子の駆動周波数、振動振幅、ニードル先端の液滴が塗布面に接触する前のニードルの初期振動振幅、ファーストコンタクトの塗布ギャップを表 3.7 に示す。ニードル先端直径が 100 μ m の場合においても、100 mPas ~100,000 mPas の範囲において、接触検知が可能であることがわかった。

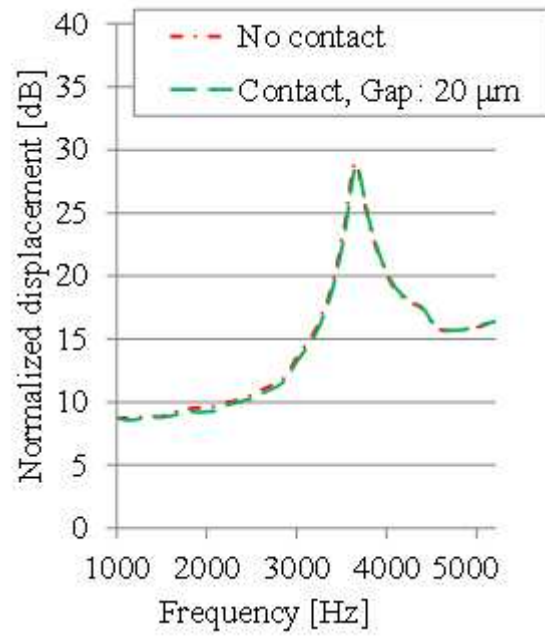
以上より、ニードル振動を用いて、ニードル先端直径が 100 μ m の場合においても、低粘度から高粘度までの液体を接触検知できることが確認された。



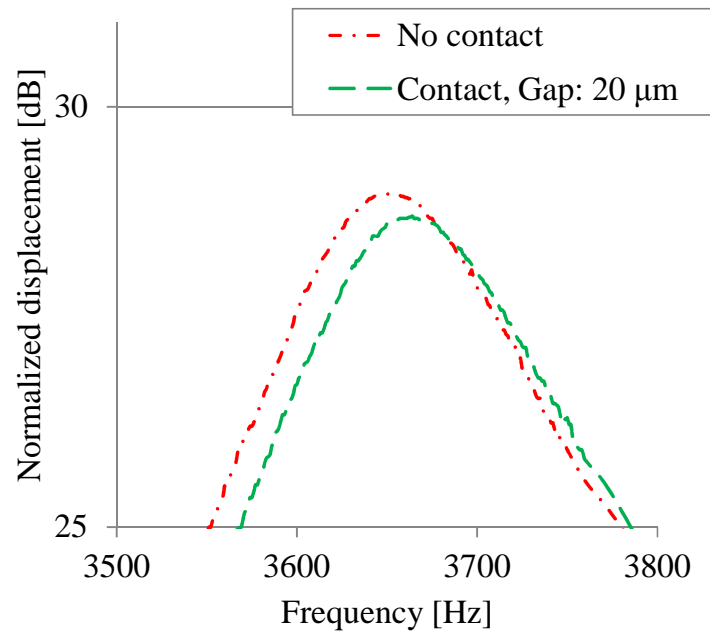
(a) 液滴付着

(b) 液滴が塗布面に接触、Gap:20 μm

図 3-40 $\phi 100\mu\text{m}$ ニードル先端の液滴:
試料液体はシリコンオイル 30,000 mPas



(a) ニードル振動変位の周波数特性



(b) 共振周波数周辺の周波数特性

図 3-41 先端直径 100 μm のニードルによる周波数特性

表 3.6 先端直径 100 μm のニードルによる周波数特性

液滴の状態	圧電素子の 振幅[μm]	ニードル振幅の 最大値[μm]	共振周波数[Hz]	Q 値	減衰定数
液滴付着	0.1456	4.094	3653	21.87	0.0229
液滴が塗布面 に接触	0.1456	3.965	3664	21.55	0.0232



(a) 100 mPas



(b) 1,000 mPas



(c) 10,000 mPas



(d) 30,000 mPas



(e) 100,000 mPas

図 3-42 各粘度におけるニードル先端の液滴の初期状態



(a) Gap: 32 μm 、非接触



(b) Gap: 29 μm



(c) Gap: 20 μm



(d) Gap: 15 μm



(e) Gap: 10 μm



(f) Gap: 5 μm



(g) Gap: 0 μm

図 3-43 塗布ギャップの違いによるニードル先端の液滴:
試料液体はシリコーンオイル 10,000 mPas

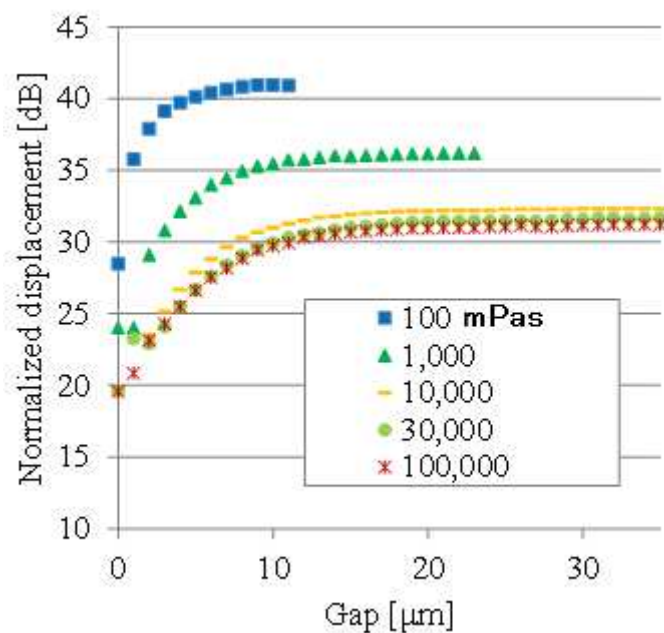


図 3-44 液体の粘度の違いによるニードル振動変位と塗布ギャップの関係

表 3.7 液体の粘度の違いによるニードル振動変位と塗布ギャップの関係

液体の粘度 [mPas]	圧電素子の駆 動周波数 [Hz]	圧電素子の振幅 [μm]	ニードルの初期 振動振幅 [μm]	ファーストコンタクト の塗布ギャップ [μm]
100	3570	0.013	1.454	8
1,000	3580	0.022	1.414	20
1,0000	3620	0.036	1.502	29
30,000	3635	0.036	1.394	30
100,000	3670	0.036	1.333	29

3.14 ニードル振動を用いた液滴塗布量の評価

液滴塗布直径は塗布ギャップが変化することではつくが、ニードル振動変位がある一定の値に減少した瞬間、ニードルを寸止めすることで、一定の塗布ギャップで液滴塗布が可能となり、塗布直径を制御することが可能であると考えられる。

そこでニードル振動を用いた液滴塗布量の評価を行うために、まず、塗布ギャップの違いによる液滴塗布量の計測を行った。4 パターンの塗布ギャップについて、塗布を行い、各塗布ギャップについて 5 回ずつ塗布を行った。すなわち計 20 回の塗布を行い、その塗布量のばらつきを基準値とした。なお、ばらつきの評価には、標本標準偏差を用いた。式(3.12)に標本標準偏差の計算式を示す[3-18]。

$$s(x) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (3.12)$$

次に、ニードル振動を用いた液滴塗布を計 20 回行い、その標本標準偏差を求めた。塗布ギャップのばらつきがある場合とニードル振動を用いた場合の標本標準偏差を比較し、評価を行った。

本実験では、液滴はシリコーンオイル、塗布面はスライドガラスを使用した。塗布した液滴を顕微鏡で観測し、その塗布直径を計測した。また、塗布されたシリコーンオイルは、時間経過とともに塗布直径が増加すると報告されている[3-11]。そこで、本実験では、4 回塗布を行ったらすぐに、塗布直径を計測した。4 回の塗布に費やす時間は約 10 分であった。4 個の塗布直径を計測するのに費やした時間は約 2 分であった。これにより、1 個目の液滴と 4 個目の液滴とでは、経過時間による誤差が生じていると考えられるが、本実験では、無視できるものとした。

先端直径 100 μm のニードルを用いて液滴塗布直径の測定評価を行った。ガラス管は、外径 2 mm、内径 0.8 mm、全長 5 mm のものを使用した。試料液体は粘度 5,000 mPas と 30,000 mPas の 2 種類のシリコーンオイルを使用した。ニードル先端に液滴が付着した後、自動 Z ステージを 1 μm ずつ下降させた。液滴塗布後は、自動 Z ステージを 2 μm ずつ上昇させた。また、ニードルの移動速度は 1 mm/s に設定した。塗布した液滴は、レーザー顕微鏡 (KEYENCE、VK-8550) で観測した。レーザー顕微鏡の観察系は、図 3-45 のような構成であり、焦点があったときのみピンホールを介して像が取得できるようになっている。

まず、塗布ギャップの違いによる液滴塗布量の測定を行った。5,000 mPas のシリコーンオイルを用いて、塗布ギャップを 0 μm 、10 μm 、20 μm 、30 μm (ファーストコンタクト) の 4 パターンで塗布を行った。図 3-46 に塗布した液滴を示す。また、図 3-47 に各塗布ギャップにおけるニードル先端の様子を示す。計 20 回の塗布による塗布直径の測定結果を図 3-48 に示す。計 20 回の塗布による塗布直径のヒストグラムを図 3-49 に示す。

次に 5,000 mPas のシリコーンオイルを使用して、ニードル振動を用いた液滴塗布を行った。圧電素子の駆動周波数を 3590 Hz、印加電圧を 0.8 V_{p-p} にした。このとき、ひずみゲージの出力値は約 1.7 V_{p-p} だった。ひずみゲージの出力値が 1.1 V_{p-p} 以下になった瞬間に、ステ

ージの下降を止め、ステージを上昇させた。図 3-50 に塗布した液滴を示す。また、図 3-51 にニードルが寸止めされたときのニードル先端の液滴を示す。計 20 回の塗布による塗布直径の測定結果を図 3-52 に示す。計 20 回の塗布による塗布直径のヒストグラムを図 3-53 に示す。

粘度 30,000 mPas のシリコンオイルを用いて、同様の実験を行った。塗布ギャップの違いによる液滴塗布では、塗布ギャップを 0 μm 、10 μm 、20 μm 、30 μm （ファーストコンタクト）の 4 パターンで塗布を行った。図 3-54 に塗布した液滴を示す。図 3-55 に各塗布ギャップにおけるニードル先端の液滴を示す。また、計 20 回の塗布による塗布直径の測定結果を図 3-56 に示す。計 20 回の塗布による塗布直径のヒストグラムを図 3-57 に示す。

同様に、30,000 mPas のシリコンオイルを使用して、ニードル振動を用いた液滴塗布を行った。圧電素子の駆動周波数を 3635 Hz、印加電圧を 1.2 V_{p-p} とした。このとき、ひずみゲージの出力値は約 1.8 V_{p-p} だった。ひずみゲージの出力値が 1.1 V_{p-p} 以下になった瞬間に、ステージの下降を止め、ステージを上昇させた。図 3-58 に塗布した液滴を示す。また、図 3-59 にニードルが寸止めされたときのニードル先端の液滴を示す。計 20 回の塗布による塗布直径の測定結果を図 3-60 に示す。計 20 回の塗布による塗布直径のヒストグラムを図 3-61 に示す。

表 3.8 に各実験における液滴塗布直径の平均値、標本標準偏差、変動係数を示す。表 3.8、図 3-49 と図 3-53 の比較、図 3-57 と図 3-61 の比較より、ニードル振動を用いることで、塗布量のばらつきが低減したことが確認された。

以上より、ニードル先端直径が 100 μm の場合において、ニードル振動を用いることで、液滴塗布量のばらつきを低減させることが可能である。本実験結果から、微少液滴塗布機構において、ニードル振動特性変化を用いた接触検知が、塗布ギャップ及び液滴塗布量の制御に有用であるといえる。

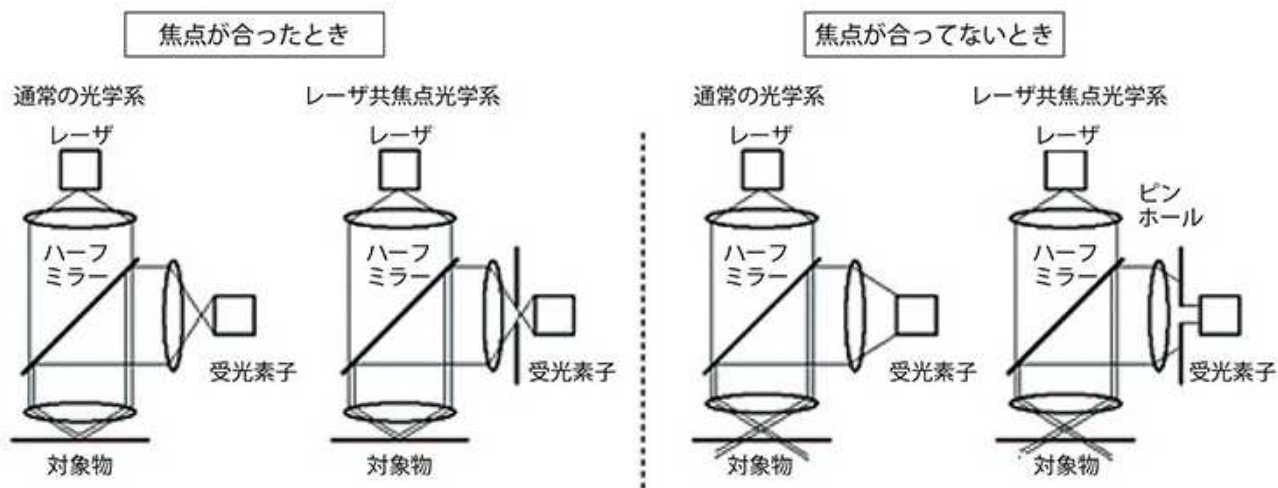


図 3-45 通常の光学系とレーザ共焦点光学系の入光イメージ

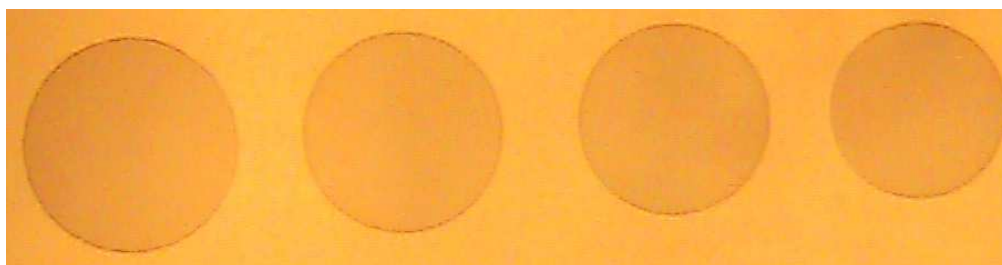


図 3-46 塗布ギャップの違いによる液滴塗布:
 左から塗布ギャップ 0 μm、10 μm、20 μm、30 μm、
 左から塗布直径 286 μm、268 μm、256 μm、242 μm、
 試料液体はシリコンオイル 5,000 mPas 、ニードル先端直径は 100 μm。

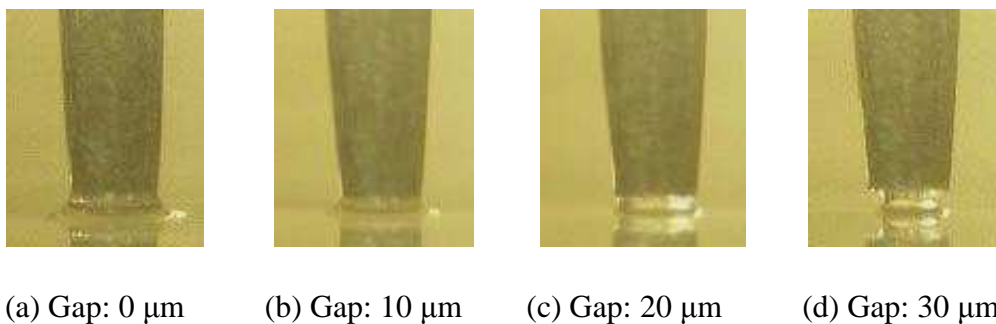


図 3-47 塗布ギャップの違いによるニードル先端の液滴:
試料液体はシリコンオイル 5,000 mPas 、ニードル先端直径は 100 μm 。

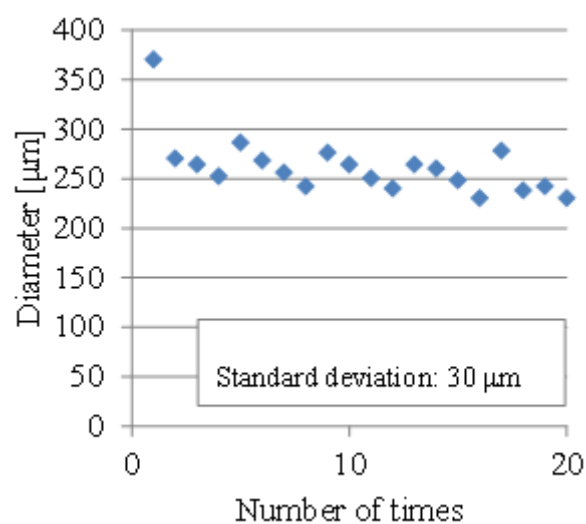


図 3-48 塗布ギャップの違いによる液滴塗布直径のばらつき:
試料液体はシリコンオイル 5,000 mPas 、ニードル先端直径は 100 μm 。

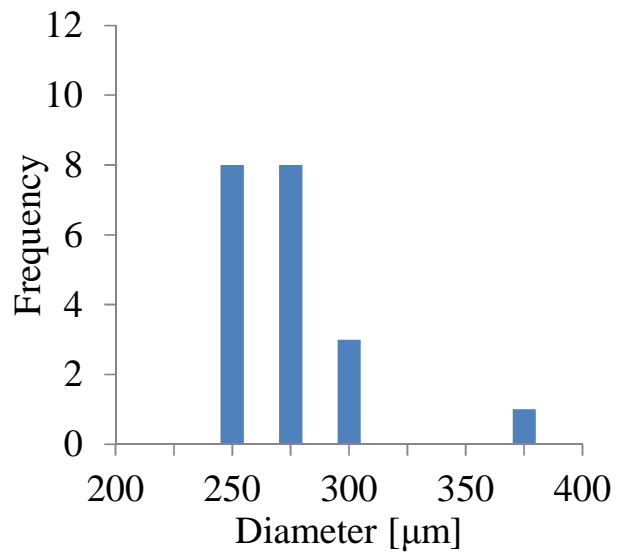


図 3-49 塗布ギャップの違いによる液滴塗布直径のヒストグラム:
試料液体はシリコンオイル 5,000 mPas 、ニードル先端直径は 100 μm。

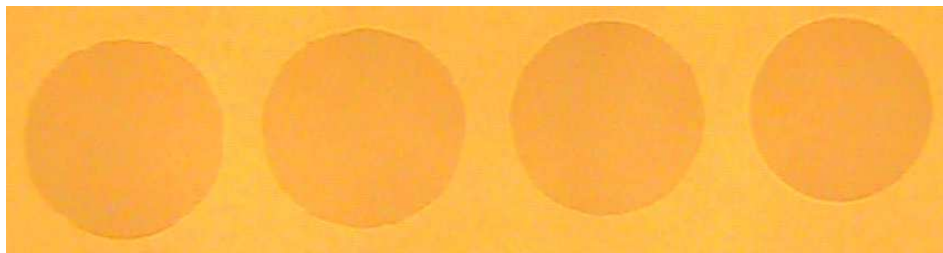
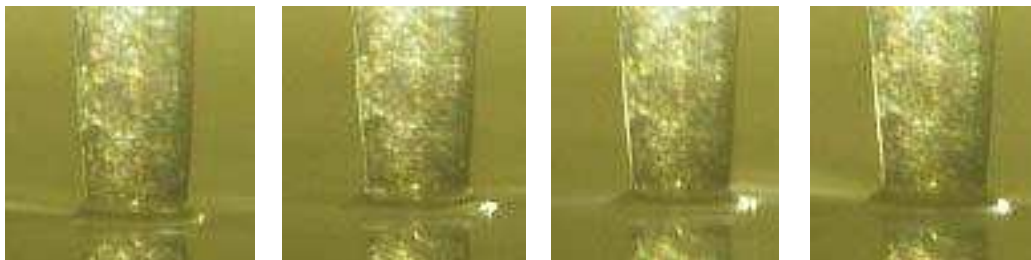


図 3-50 ニードル振動を用いた液滴塗布
左から塗布直径 266 μm、266 μm、258 μm、248 μm、
試料液体はシリコンオイル 5,000 mPas 、ニードル先端直径は 100 μm。



(a) 5 回目

(b) 6 回目

(c) 7 回目

(d) 8 回目

図 3-51 ニードル振動によるニードル先端の寸止め:
試料液体はシリコンオイル 5,000 mPas 、ニードル先端直径は 100 μm。

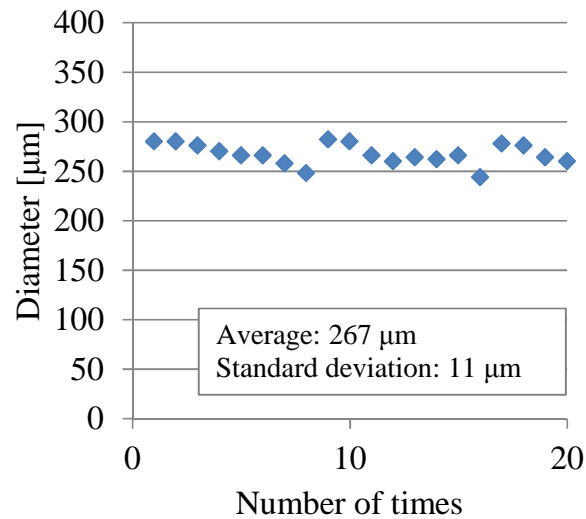


図 3-52 ニードル振動を用いた場合の液滴塗布直径のばらつき:
試料液体はシリコンオイル 5,000 mPas 、ニードル先端直径は 100 μm。

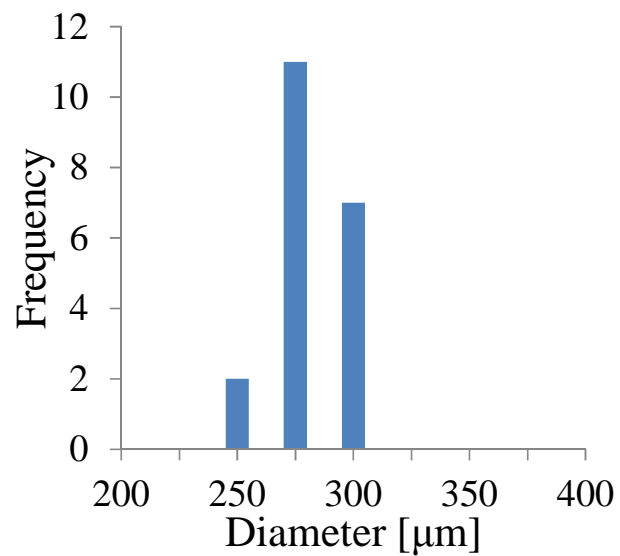


図 3-53 ニードル振動を用いた場合の液滴塗布直径のヒストグラム:
試料液体はシリコンオイル 5,000 mPas 、ニードル先端直径は 100 μm。

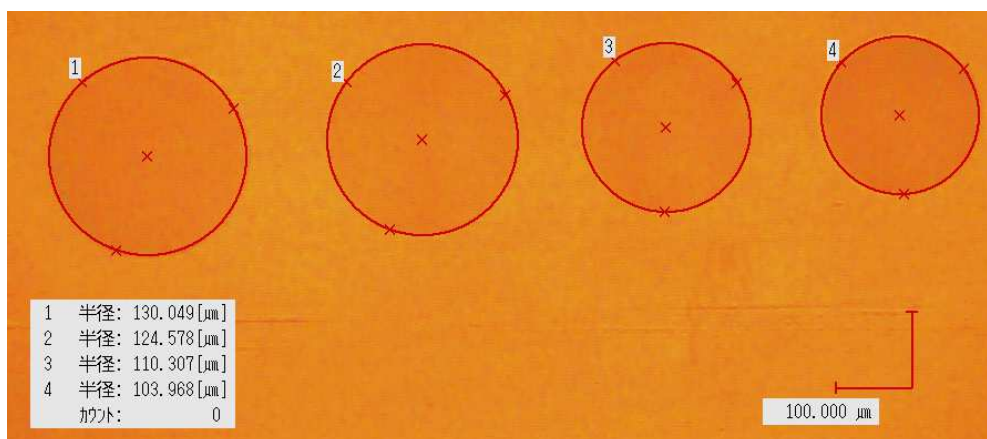
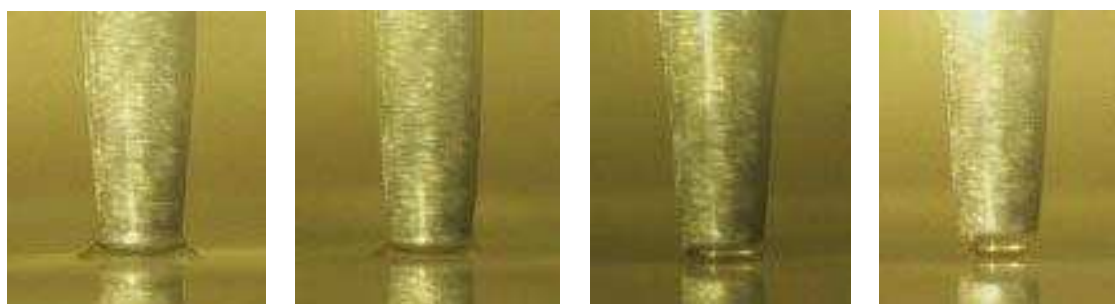


図 3-54 塗布直径の計測方法:

左から塗布ギャップ 0 μm、10 μm、20 μm、30 μm、
 左から塗布直径 260 μm、249 μm、221 μm、208 μm、
 試料液体はシリコンオイル 30,000 mPas 、ニードル先端直径は 100 μm。



(a) Gap: 0 μm

(b) Gap: 10 μm

(c) Gap: 20 μm

(d) Gap: 30 μm

図 3-55 塗布ギャップの違いによるニードル先端の液滴:

試料液体はシリコンオイル 30,000 mPas 、ニードル先端直径は 100 μm。

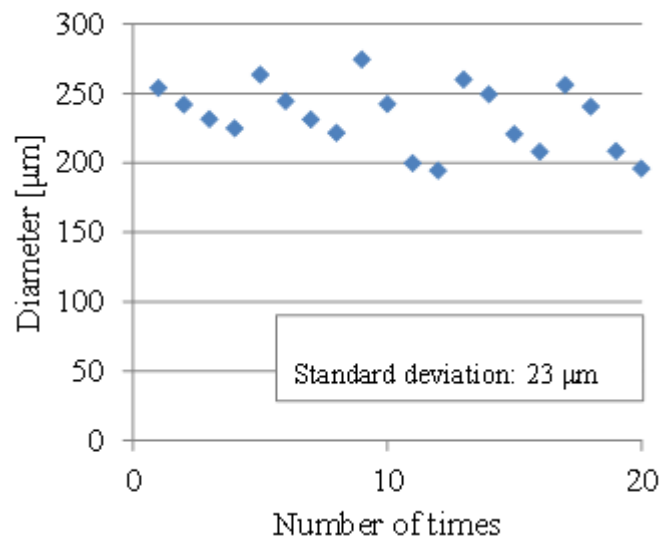


図 3-56 塗布ギャップの違いによる液滴塗布直径のばらつき:
試料液体はシリコンオイル 30,000 mPas 、ニードル先端直径は 100 μm 。

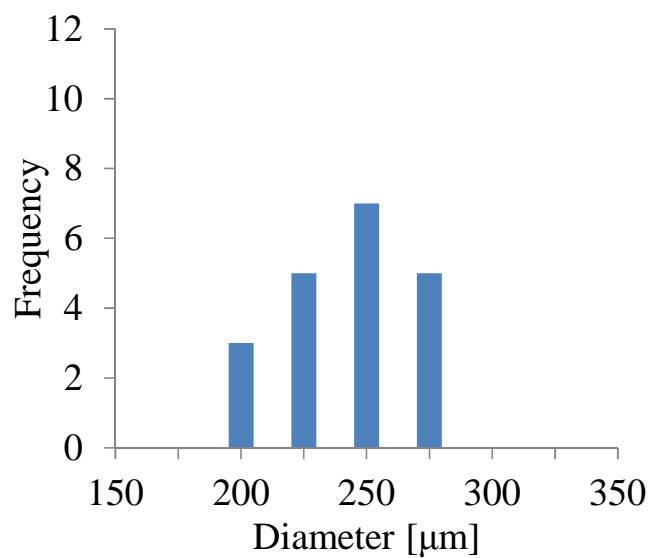


図 3-57 塗布ギャップの違いによる液滴塗布直径のヒストグラム:
試料液体はシリコンオイル 30,000 mPas 、ニードル先端直径は 100 μm 。

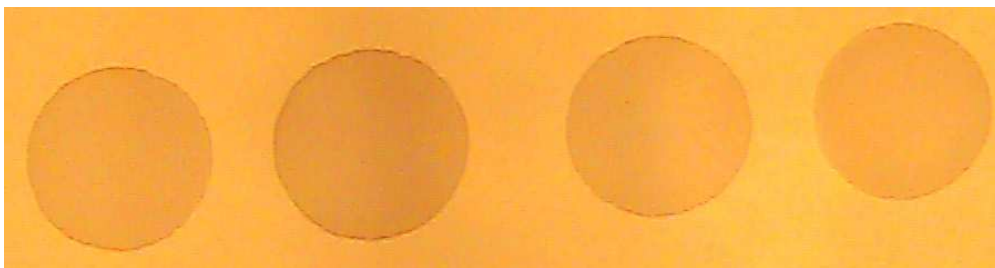


図 3-58 ニードル振動を用いた液滴塗布
左から塗布直径 245 μm 、256 μm 、243 μm 、239 μm 、
試料液体はシリコンオイル 30,000 mPas 、ニードル先端直径は 100 μm 。



(a) 9 回目 (b) 10 回目 (c) 11 回目 (d) 12 回目

図 3-59 ニードル振動によるニードル先端の寸止め:
試料液体はシリコンオイル 30,000 mPas 、ニードル先端直径は 100 μm 。

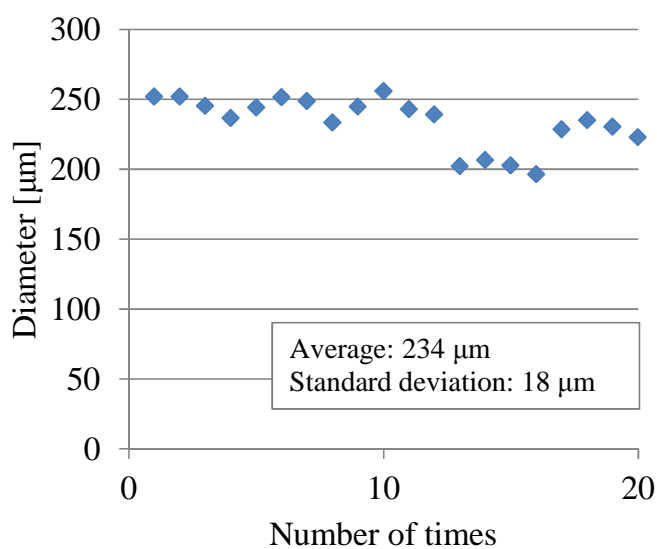


図 3-60 ニードル振動を用いた場合の液滴塗布直径のばらつき:
試料液体はシリコンオイル 30,000 mPas 、ニードル先端直径は 100 μm 。

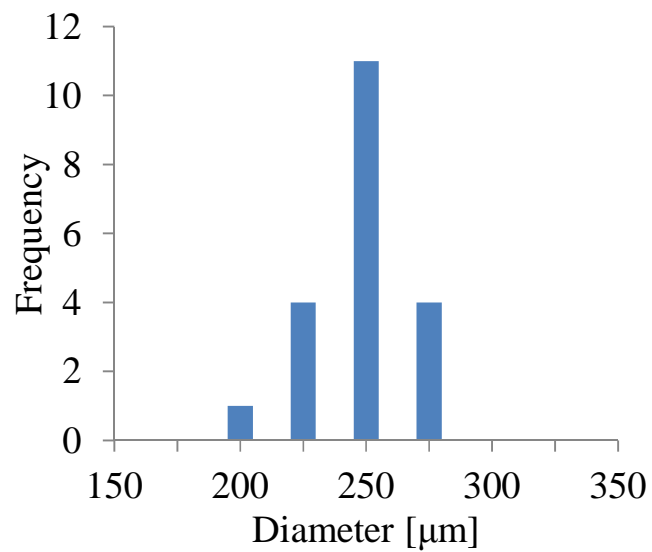


図 3-61 ニードル振動を用いた場合の液滴塗布直径のばらつき：
試料液体はシリコーンオイル 30,000 mPas 、ニードル先端直径は 100 μm。

表 3.8 先端直径 100 μm のニードルを用いた
各実験における液滴塗布直径のばらつき

塗布の方法	液体の粘性 [mPas]	平均値 [μm]	標準偏差 [μm]	変動係数
塗布ギャップの 違いによる 液滴塗布	5,000	261	30	0.115
	30,000	233	23	0.101
ニードル振動を 用いた液滴塗布	5,000	267	11	0.040
	30,000	234	18	0.079

3.15 まとめ

本章ではまず微量の液滴塗布技術の必要性とその現状について触れ、我々の研究グループで研究開発されてきたニードル式液滴塗布機構の有用性とその問題点を述べた。ニードル式液滴塗布機構の問題点である塗布ギャップの制御を目的として、ニードル振動を用いた液滴と塗布面との接触検知手法を提案した。ニードル先端接触検知法は、ニードルを機械共振機構で微小振動させ、先端部の液滴が対象物に接触した瞬間に機械共振点が変化することを利用して、接触検知を行う方法である。

次にニードル振動特性変化を用いた液滴と塗布面との接触検知の有用性を実験的に確認するために、ニードル振動機構を試作した。試作したニードル振動機構を用いた実験により、ニードル振動を用いた接触検知が有用であることを示した。

さらにニードル式液滴塗布機構と同等の構成におけるニードル振動を用いた液滴と塗布面との接触検知の有用性を確認するために、試料液体の粘度、ニードル先端直径を変化させて実験を行った。実験からニードル振動を用いて、低粘度(100mPas)から高粘度(100,000mPas)までの液体を接触検知できることが確認された。また、ニードル振動の有無による液滴塗布直径の違いを観測し、ニードル振動を用いた液滴塗布直径の制御が可能であることを示した。

第4章 圧電インパクト駆動による微小液滴塗布機構

4.1 はじめに

第3章で述べたニードル式液滴塗布装置では、塗布量の精度を上げるために、ニードル先端部に付着した液体の塗布基板上への接触検知方法に着目し、オンマシンで接触検知する方法として、ニードルを機械共振機構で微小振動させ、先端部の液滴が対象物に接触した瞬間に機械共振点が変わることを利用して、接触検知することを提案した。しかし、ニードル式液滴塗布機構では、ニードルの接触検知だけではなく、塗布の高速・高精度化を目標に変位拡大機構付圧電素子を用いた塗布機構（図4-1）を開発していたが、圧電素子のヒステリシスも拡大され、また、位置決め分解能が低下したために、微細な液滴（塗布直径 100 μ m 以下）塗布は困難であった。このため、ニードル駆動ストロークの増加、高分解能を実現できる機構が要求された。また、ニードルの高速駆動時に液体が泡立つなどして液体中に空隙ができ、その空隙に液体が流れ込む時間がかかり、ニードルの高速駆動による塗布が困難であった（図4-2）[4-1]。このためニードル駆動の高速化には限界があり、ニードル駆動軸を増やす多軸化が塗布効率を高めることとなり、有利であることが明らかになり、ニードル駆動に圧電インパクト駆動方式を適用することで、可動範囲の拡大、高分解能位置決め、小型化による多軸化が図れ、これらの要求を満たすことができると考えた。

そこで第4章では、最初に圧電インパクト駆動による微小液滴塗布装置の構成について述べる。そして塗布原理と塗布目標を示す。

次に微小液滴塗布機構に用いる圧電インパクト駆動の動作原理について述べる。圧電素子に印加する駆動電圧波形に着目し、先端突起付き矩形波を提案し、従来ののこぎり波形との特性の相違について比較し、得られる加速度成分について説明している。得られた加速度から移動体の締め付け力を決定し、圧電インパクト駆動式微小液滴塗布機構を試作している。

そして試作機に先端突起付き矩形波を入力した際の移動性能について、実験結果により示す。さらに圧電インパクト駆動される V 溝 XY ステージと組み合わせて微小液滴塗布装置を構成した。微小液滴塗布装置を用いてニードル直径と液体粘度を変化させた場合の塗布について実験結果を示している。

ハードウェア構成

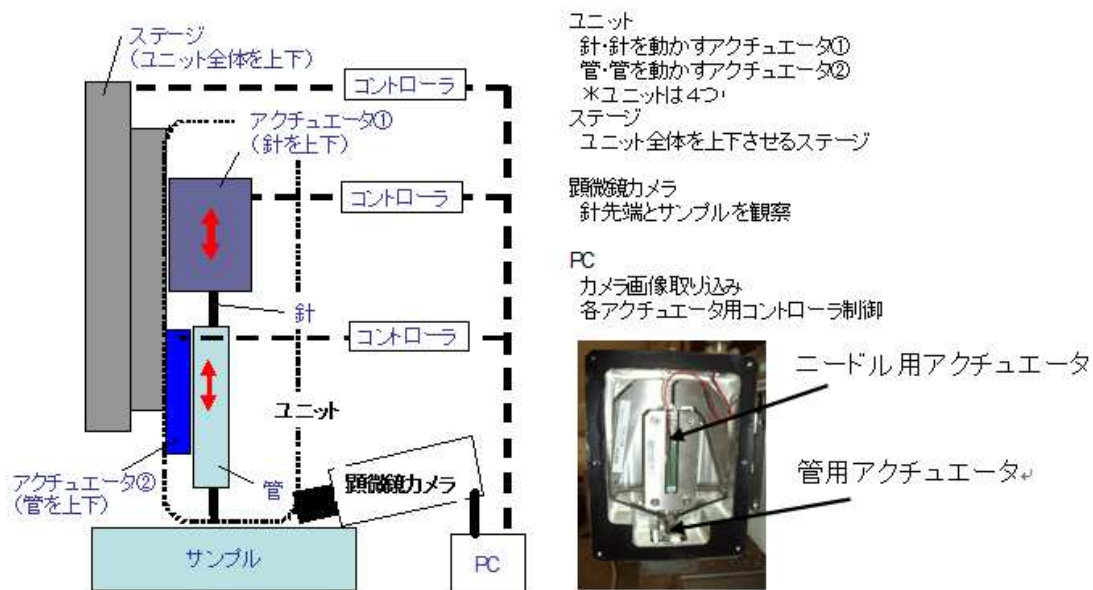


図 4-1 変位拡大機構付き圧電素子を用いたニードル式液滴塗布装置
(出典：株式会社アプライド・マイクロシステム)

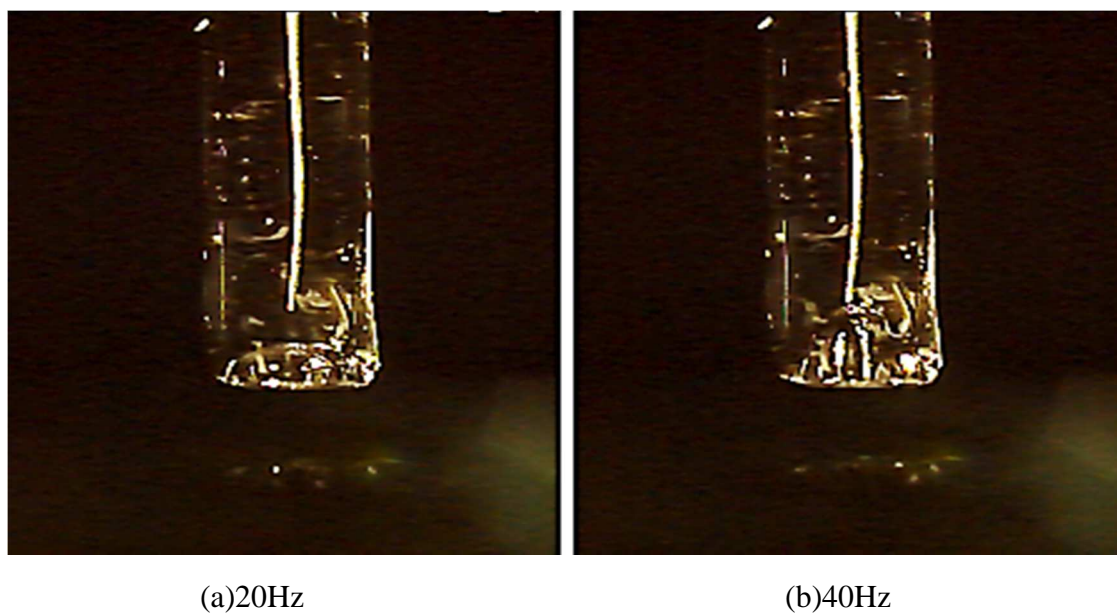


図 4-2 液体下面の様子

4.2 圧電インパクト駆動による微小液滴塗布装置の構成

圧電インパクト駆動による微小液滴塗布装置の構成イメージを図 4-3 に示す。微小液滴塗布装置は、下側に圧電インパクト駆動による XY ステージを配し、上側に圧電インパクト駆動による微小液滴塗布機構を配置している。塗布基板は XY ステージのテーブル面に設置される。塗布液体はピペット内に充填されており、表面張力によって保たれていて、ピペット先端から垂れて流れることはない。ピペット先端と塗布基板の間は離れていて隙間が存在する。圧電インパクト駆動による微小液滴塗布機構は、圧電素子に接続されたシャフトと、シャフトに締め付けられたスライダーから構成されている。ニードルはスライダーに固定され、ピペットの液体内を貫通している。スライダーがシャフト上を圧電インパクト駆動により上下に移動することによって、ニードルがピペット内を上下に動き、ニードル先端に付着した微小量の液体が塗布基板表面に転写される。塗布位置は、XY ステージを圧電インパクト駆動により移動させることで、精密に位置決めされる。

微小液滴塗布装置で塗布に使用される液体の粘度は高粘度 (50,000~100,000mPas) とし、特に高粘度を精密 ($\phi 10\mu\text{m}$) に塗布できることを目標としている。低抵抗値を実現するために、高粘度の導電ペーストを極細ニードルで塗布する。ニードルの形状は、スライダーに固定される部分がストレートで、先端部は電解研磨によりその直径とテーパ部の長さを制御する (図 4-4) [4-2]。微小液滴塗布機構部を小型化することで、微小液滴塗布機構部を複数台連結させて塗布の効率化を図れるように、また装置全体の小型化を目指す。

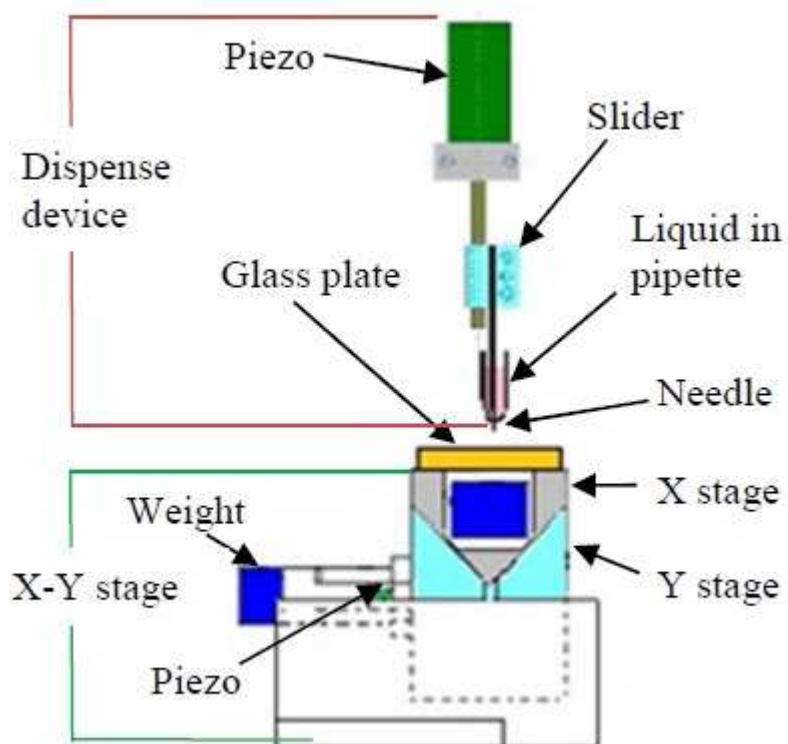


図 4-3 圧電インパクト駆動による微小液滴塗布装置イメージ

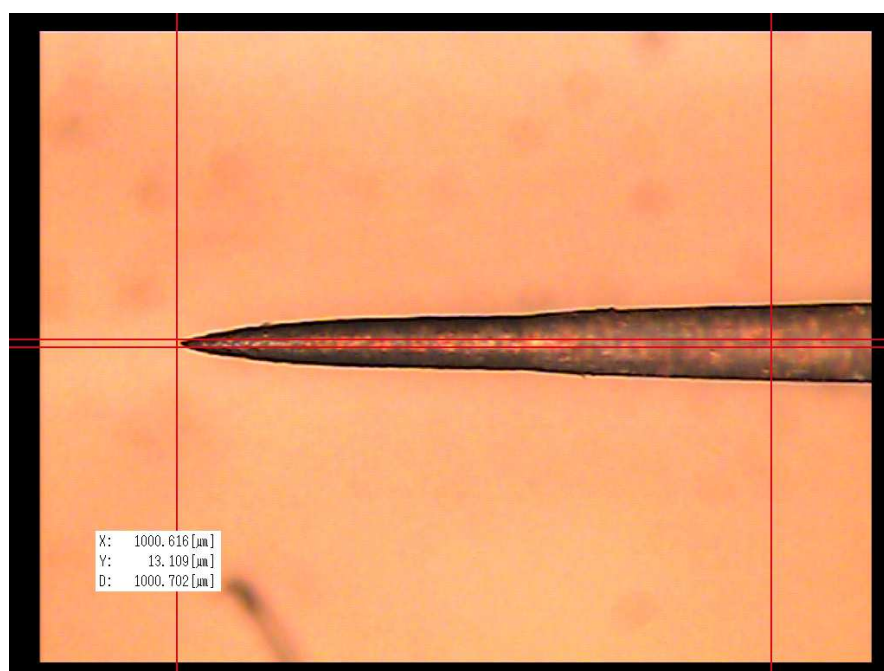


図 4-4 ニードル形状（全体）

4.3 塗布原理

微小液滴塗布機構による塗布の原理について図 4-5 に示す。(a)は、初期位置である。極微小液滴塗布機構は、圧電素子に接続されたシャフトと、シャフトに締め付けられたスライダーから構成されている。ニードルはスライダーに固定され、ピペット内に下ろされている。ピペット内には塗布する液体が充填されている。(b)は、スライダーがシャフト上を下り、ニードルがピペットを貫通し、ニードル先端部には液体が付着している。(c)の時、ニードルがさらに降下し、ニードル先端部に付着した液体が塗布基板上に接触する。(d)では、スライダーがシャフト上を上昇し、ニードル先端部も塗布基板から離れる。この際に、塗布基板表面には、ニードル先端部に付着していた液体が転写され、液体の塗布が行われる。

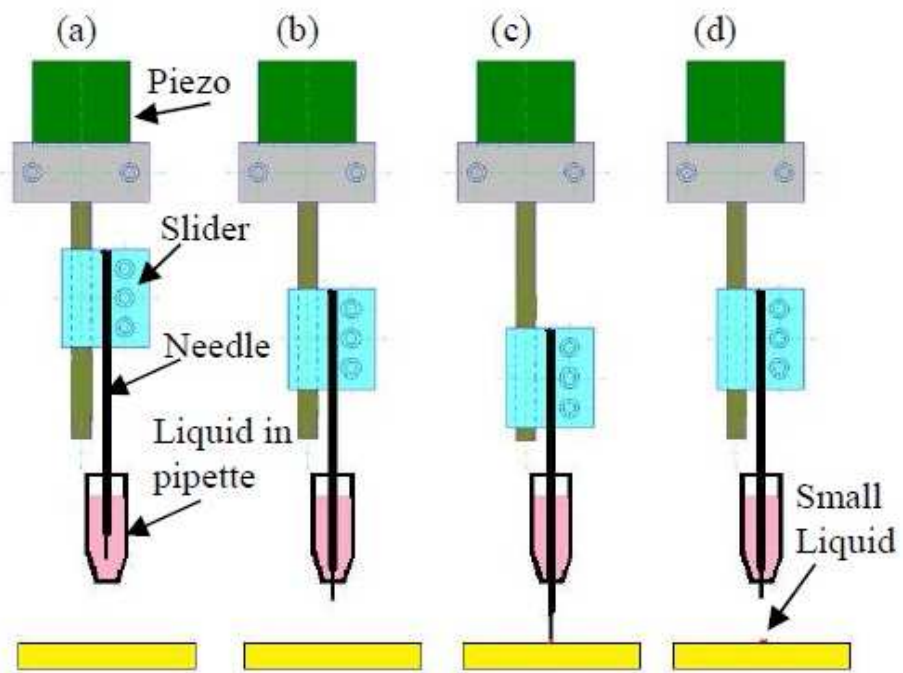


図 4-5 微小液滴塗布機構の塗布原理

4.4 微小液滴塗布機構に用いるインパクト駆動の動作原理

微小液滴塗布機構に用いるインパクト駆動の動作原理について図 4-6 に示す。シャフトは圧電素子に接続されており、圧電素子に駆動電圧を印加すると、スライダはスティック・スリップ方式でシャフト上を移動する。図 4-6 (a)は、初期位置である。この時、スライダはシャフトに締め付けられており、自重で落下することはない。スライダの締め付け力と自重は (4-1) 式の関係にある。

$$\mu_{\max} F > Mg \quad (4-1)$$

一方、スライダに取り付けられたニードルが高粘度液体中を進むとき、ニードルは粘性抵抗を受ける (図 4-7)。

微視的な観点から粘性抵抗 W を求めると、

粘性力 (せん断応力) $f = \eta \cdot v / d = W / S$

粘性抵抗 $W = f \cdot S$

$f = 16666.6 \text{ N/m}^2$

粘性係数 η 50 Pa s

流速 (ニードル速度) v 0.1 m/s

間隔 d 0.0003 m

接触面積 S 0.0000039 m²

粘性抵抗 W 0.0654 kg · m/s²

となり、粘性抵抗 W は、スライダにかかる力 $\mu_{\max} \cdot F = 4.2 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2$ に比べて、2 ケタ小さくなる。

また巨視的な観点から粘性抵抗 W を求めると、

流速 (ニードル速度) v 0.00025 m/s

粘性力 F 41.67 kg · m/s²

粘性抵抗 W 0.000164 kg · m/s²

となり、粘性抵抗 W は、スライダにかかる力 $\mu_{\max} \cdot F = 4.2 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2$ に比べて、4 ケタ小さくなる。

よってスライダをインパクトドライブで駆動する際のスライダにかかる力 (推力・重力・締め付け力による摩擦力) に比べて、ニードルの断面積および移動速度が小さいために粘性抵抗については考慮しない。

図 4-6 (b)では、圧電素子に急速に電圧を印加する。圧電素子が急速に伸び大きな加速度を発生し、その変位によって、圧電素子に接続されたシャフトは下方向へ急速に移動し、大きな加速度を得る。この時、スライダのシャフトに対する締め付け力による摩擦力よりも、シャフトの移動によって発生する加速度が大きい場合、スライダはシャフト上で滑り (スリップ)、慣性の法則に従ってその場にとどまり、始めの位置から動かない。この時の関係

は次式で表すことができる。

$$a_s > \frac{\mu_{max}F}{M} \quad (4-2)$$

次に図 4-6 (c)の時、圧電素子にゆっくりと電圧を印加する。圧電素子はゆっくりと縮み、その変位によってシャフトは上方へ移動し初期位置に戻る。この時、スライダーのシャフトに対する締め付け力による摩擦力よりも、シャフトの移動によって発生する加速度が小さい場合、スライダーはシャフトに締結されたまま(スティック)でシャフトと一緒に移動する。この時の関係は (4-3) 式に示す。

$$a_s < \frac{\mu_{max}F}{M} \quad (4-3)$$

この(a)～(c)のプロセスを繰り返すことで、スライダーはシャフト上を精密に移動することができる。

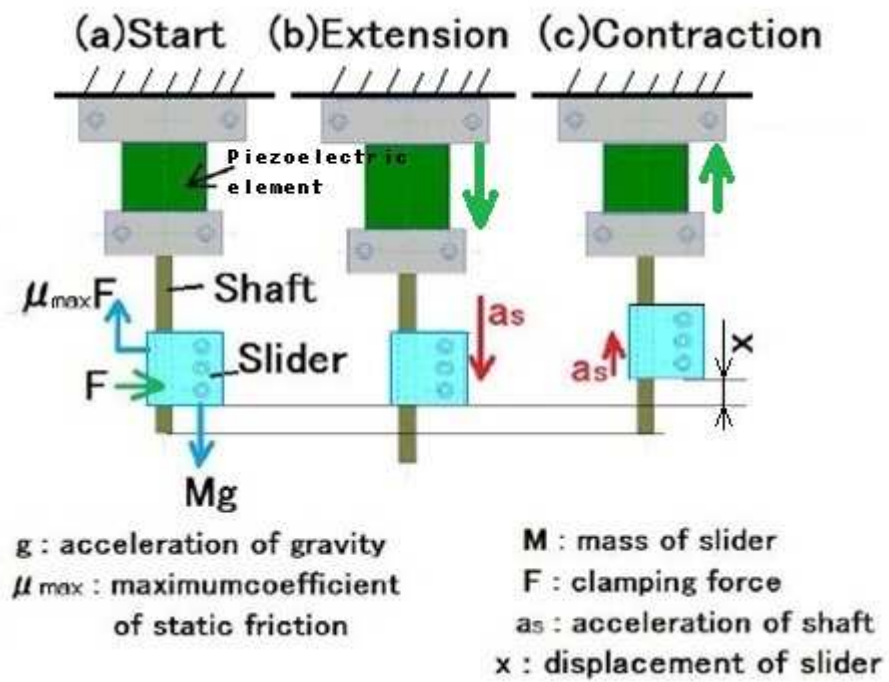


図 4-6 微小液滴塗布機構の動作原理

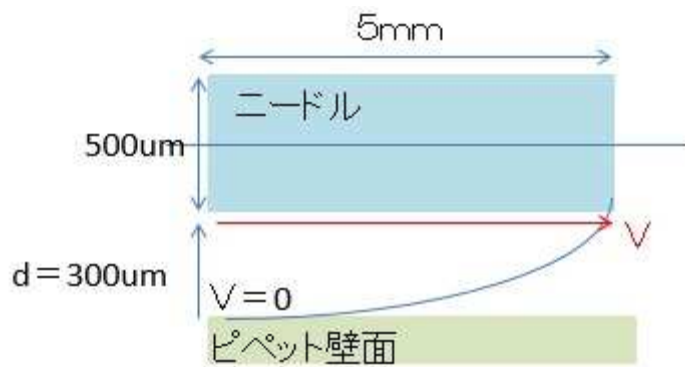


図 4-7 ニードルの受ける粘性抵抗

4.5 インパクト駆動に適した波形

圧電インパクト駆動に用いられる電圧波形には、様々な波形があるが、よく知られている波形として、のこぎり波がある[4-3]。理想的なのこぎり波を図 4-8(a)破線に示す。圧電素子に印加される電圧波形は、そのまま圧電素子の変位変化の様子を表している。このためインパクト駆動に用いる電圧波形（のこぎり波）を圧電素子の変位変化として、速度変化、加速度変化を得ることができる。速度変化を図 4-8(b)破線に、加速度変化を図 4-8(c)破線に示す。図 4-8(c)破線において、①、②で大きな加速度が得られている。③は①、②よりも小さい加速度となっている。圧電インパクト駆動を用いて微小液滴塗布機構を動作させる際に、図 4-8(a)破線ののこぎり波を入力することを仮定し、4.3 章で上述した式 (4-1)、(4-2)、(4-3) を満たすように、圧電素子の加速度と、スライダの締め付け力による摩擦力の関係について、図中点線のように閾値を設けた。図中の上下の点線内側では、スライダの締め付け力による摩擦力は加速度よりも大きく、スライダはシャフトに締結され（スティック）、シャフトと共に移動する。図中の閾値の点線外側では加速度が大きくなるため、スライダは滑り（スリップ）、その場から動かない。つまり、①、②の時にスライダは滑り、動かず（スリップ）、その後、スライダはシャフトに締結され（スティック）、シャフトと一緒に移動すると考えられる。

しかし実際の実験においては、理想的なのこぎり波である図 4-8(a)破線は、圧電素子を駆動する電圧回路の遅れや、圧電素子-質量の機械的動特性のために、実際の圧電素子の変位は、緑色実線のような形状になっていると考えられる。簡単のために、ここでは変位の時間応答は 2 次曲線として、この時の速度変化を同図(b)に水色実線で、加速度変化を同図(c)に赤色実線で示す。加速度変化に着目すると、圧電素子が伸びて縮む瞬間②と、圧電素子の変位がゼロに戻った時③に、比較的大きな加速度がそれぞれ逆向きに発生していることがわかる。このことは、スライダが不安定に滑っていることを示している。実際の実験でもこの現象は頻繁に観察されている。つまり、理想状態ののこぎり波と実際ののこぎり波では、スティック・スリップの発生するタイミングが異なっており、理想状態ののこぎり波で想定されていたスライダの運動状態、変位量は、実際ののこぎり波では得られないことを示している。

そこで圧電素子の新しい駆動波形を提案する。新しい駆動波形は、波形先端部に突起の付いた矩形波であり、その形状を図 4-9(a)破線に示す。図 4-9(a)破線は理想的な波形であり、圧電素子の変位変化の様子を表している。この変位変化から、速度変化、加速度変化を得ることができ、速度変化を図 4-9(b)破線に、加速度変化を図 4-9(c)破線に示す。圧電素子を駆動する電圧回路の遅れや、圧電素子-質量の機械的動特性の影響を考慮した実際の先端突起付き矩形波形について、それぞれ、変位変化を同図(a)、速度変化を同図(b)に水色実線で、加速度変化を同図(c)に赤色実線で示す。

圧電インパクト駆動を用いて微小液滴塗布機構を動作させる際に、図 4-9(a)破線の先端突起付き矩形波形を入力することを仮定し、4.3 章で上述した式 (4-1)、(4-2)、(4-3) を満たすように、圧電素子の加速度と、スライダの締め付け力による摩擦力の関係について、図中点

線のように閾値を設けた。図中の上下の点線内側では、スライダーの締め付け力による摩擦力は加速度よりも大きく、スライダーはシャフトに締結され（スティック）、シャフトと共に移動する。図中の閾値の点線外側では加速度が大きくなるため、スライダーは滑り（スリップ）、その場から動かない。つまり、①、①'、②の時にスライダーは滑り、動かない（スリップ）。その後の②'、③、④、④'、⑤は、①、①'、②よりも小さい加速度となり、スライダーはシャフトに締結され（スティック）、シャフトと一緒に移動すると考えられる。この先端突起付き矩形波形を圧電インパクト駆動に用いた場合、スライダーの1ステップでの移動量は、圧電素子の全変位量よりも小さくなることがわかる。スライダーは先端突起付き矩形波形の前半部①、①'、②と、それ以降の後半部で、スリップとスティックを行い、波形1サイクル中で1度だけ慣性力が発生するため、安定した移動が実現できると考えられる。

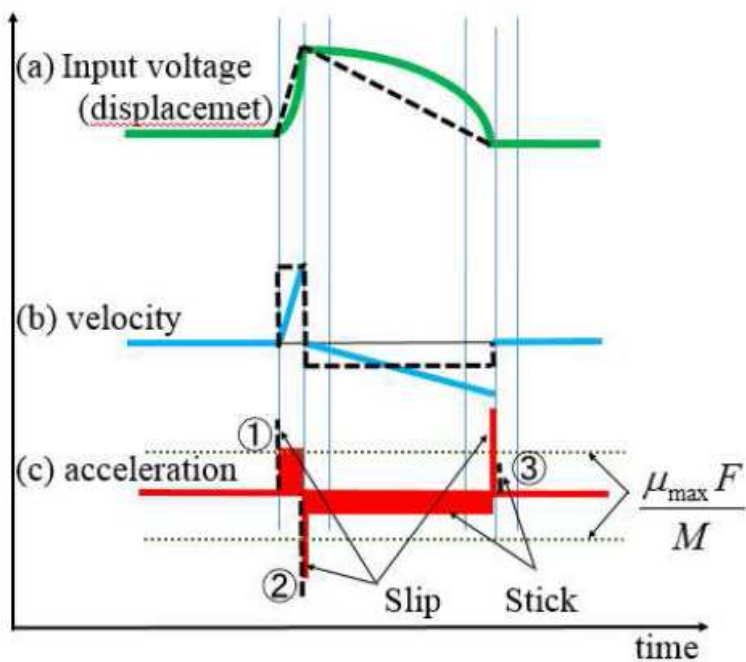


図 4-8 圧電インパクト駆動に用いられるのこぎり波形における変位・速度・加速度の関係

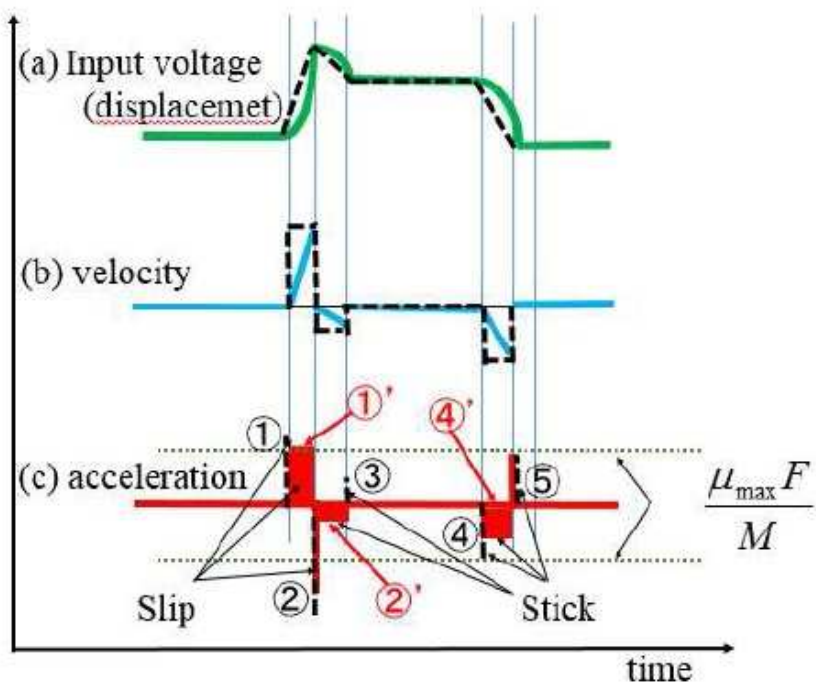


図 4-9 先端突起付き矩形波における変位・速度・加速度の関係

4.6 試作した圧電インパクト駆動式微小液滴塗布機構の構成

圧電インパクト駆動式微小液滴塗布機構の構成を図 4-10 に示す。圧電インパクト駆動式微小液滴塗布機構は、圧電素子に接続されたシャフトと、シャフトに締め付けられたスライダ、スライダに取り付けられたニードル、液体を充填したピペットから構成されている。スライダには締め付け力調整ねじ 2 本とロック用ねじ 1 本がついている。構成部品の詳細な寸法を図 4-11①～④に示す。シャフトは直径 1mm、有効長さ 10mm（全長 12mm、PZT ベース①への圧入部 2mm）、重さ 0.06g である。スライダは、長さ 5mm、幅 4.5mm、高さ 1.3mm、スリット幅 0.3mm、重さ 0.21g である。実際に試作した圧電インパクト駆動式微小液滴塗布機構の構成を図 4-12 に示す。スライダに取り付けているニードルは、材質タングステン、先端直径 300 μ m、長さ 20mm、重さ 0.01g である。圧電素子は NEC トーキン製 AE0505D08F を用いた。シャフトとスライダ間の最大摩擦係数は、実験により求めており、 $\mu_{\max}=0.42$ であった。PZT ベース V①、U④には、圧電素子を正確に位置合わせして接着できるように、接着面部を 0.1mm 掘り込んである。また PZT ベースは、①よりも④の外形寸法を大きく製作してある。材質はいずれも SUS303 を使用している。一般に、工業用圧電インパクト駆動機構では、移動体と移動面の材質について、傷がつきにくく、面精度が出しやすく、経時変化しにくい材質を望み、人工サファイア等を使用することが多い[4-4]。しかし本研究では、機構の低価格化も検討しているために、入手しやすいステンレスを用いた。スライダはシャフトに締め付け力調整ねじ 2 本とロック用ねじ 1 本を用いて取り付けられている。これら 3 本のねじはいずれも M1（ねじピッチ 0.25mm、有効径 0.838mm）である。締め付け力調整ねじを締めこむと、スライダのスリット部の間隔が狭まり、円筒部は径方向に狭まり、スライダはシャフトを締め付けた状態となる。この状態で、ロック用ねじを締めると、スライダはシャフトに締結固定される。シャフトに接続されたニードルはピペット内に下ろされており、圧電インパクト駆動でスライダがシャフト上を下に移動すると、ニードルはピペットを貫通して、ピペット先端からニードル先端が飛び出し、その先端部にはピペット内に充填されていた液体が付着している状態となる。このニードル先端に付着した液体を塗布対象に接触させることで液体の転写を行い、塗布される。

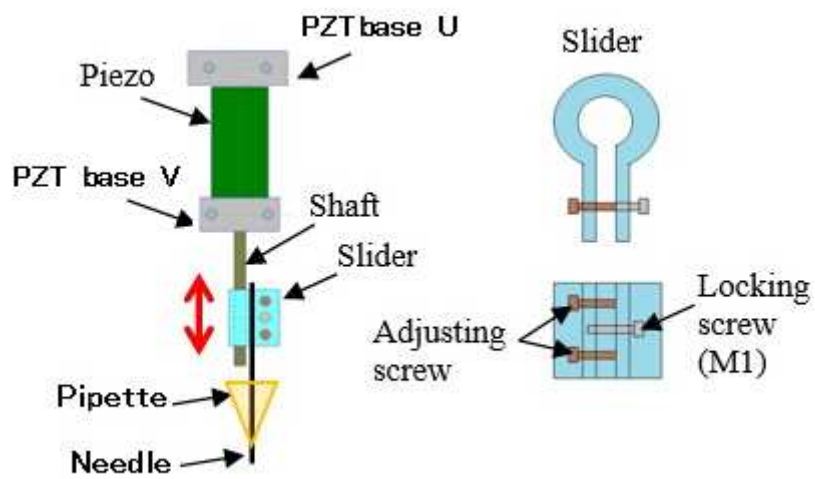
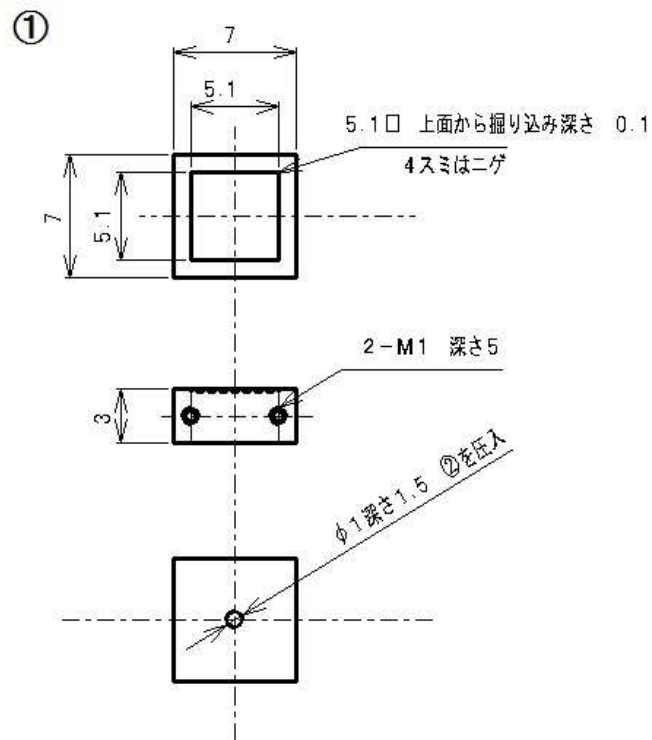
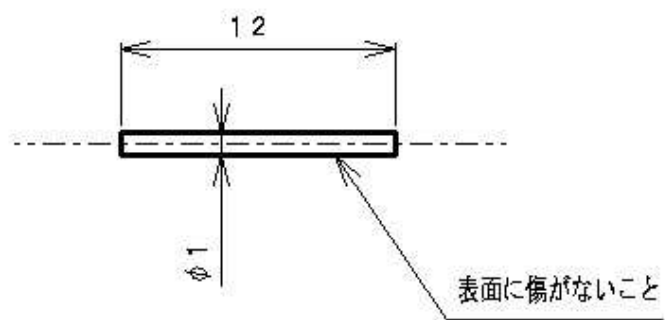


図 4-10 圧電インパクト駆動式微小液滴塗布機構の構成



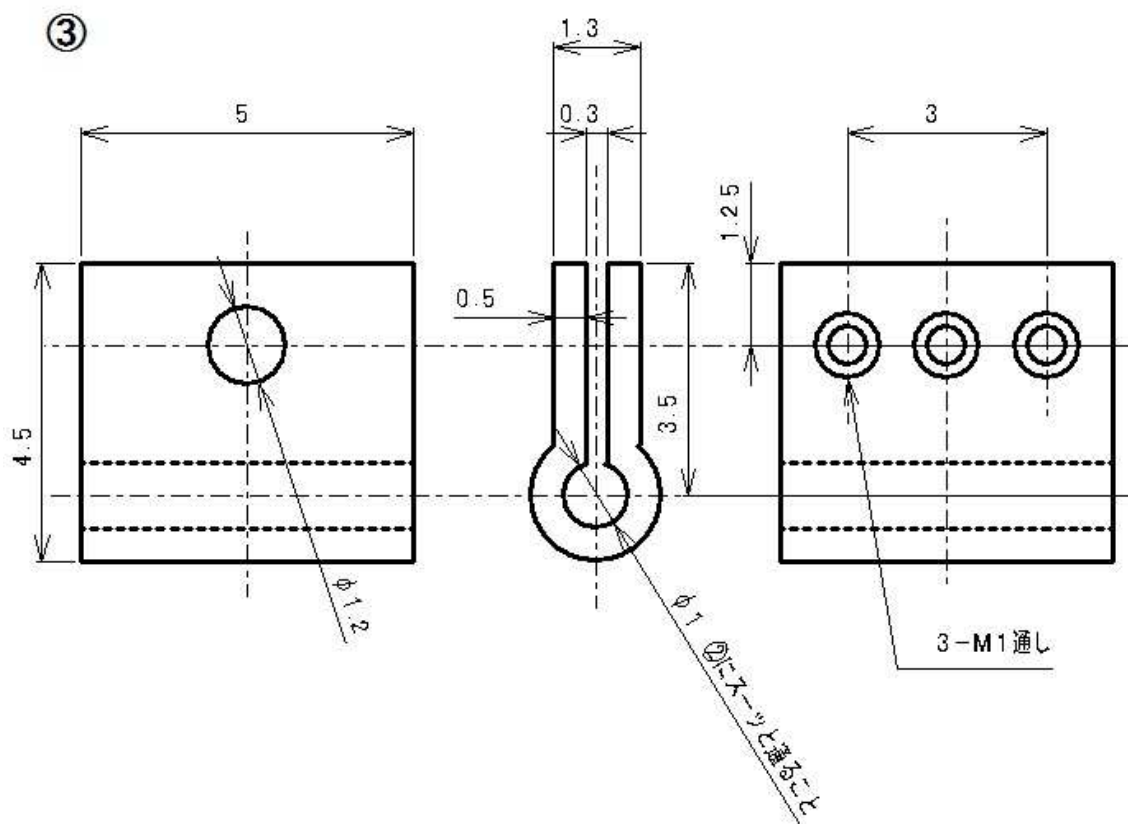
① PZT ベース V

②



② シャフト

③



③ スライダー

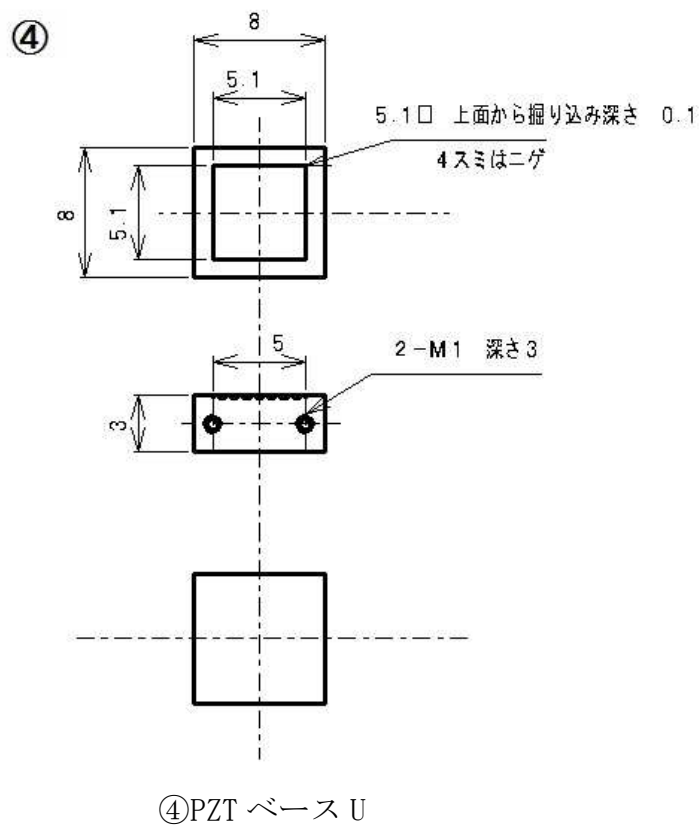


図 4-11 構成部品詳細図



図 4-12 試作した圧電インパクト駆動式微小液滴塗布機構

4.7 駆動システム構成

この圧電インパクト駆動式微小液滴塗布機構の駆動システムを図 4-13 に示す。駆動システムは、3つの部分に分けることができ、制御部には、PC と D/A ボードがあり、電源供給部には増幅回路があり、滴塗布機構部が圧電インパクト駆動式微小液滴塗布機構を表している。PC に設置された D/A 変換ボード (PCI-3329、12bit、8ch、インタフェース社製) から、圧電素子へ印加するための電圧指令をアナログ出力 (-2V ~ $+2\text{V}$ まで) し、それを電源アンプ (ERP-1201K、max120V 出力、バイアス電圧 60V、エコー電子社製) で 30 倍に増幅したのち、圧電インパクト駆動式微小液滴塗布機構の圧電素子に供給している。PC から D/A ボードの制御および圧電インパクト駆動式微小液滴塗布機構の駆動電圧波形作成、駆動プログラム、塗布オペレーションプログラムは、VisualBasic を用いて作成している。

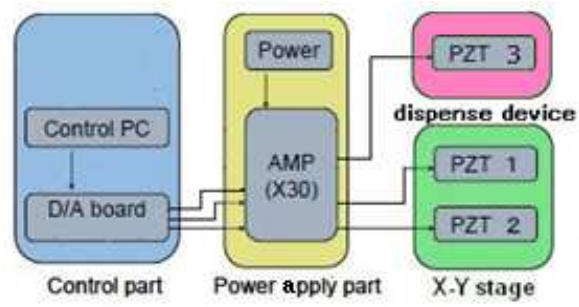


図 4-13 駆動システム構成

4.8 予備実験

圧電インパクト駆動式微小液滴塗布機構の圧電素子に、駆動電圧波形として、先端突起付き矩形波を印加した際の圧電素子の変位について調べた。実験装置の構成を図4-14に示す。圧電インパクト駆動式微小液滴塗布機構の A (PZT ベース V) の部分を固定し、圧電素子に電圧を印加し、(PZT ベース U 側に配置した) 静電容量型変位計 (ADE 3046-A02) で圧電素子の変位を測定した。測定結果を図 4-15 に示す。圧電素子に 40V の先端突起付き矩形波を印加したとき、圧電素子の変位は約 $1\mu\text{m}$ が得られた。この変位から、速度変化、加速度変化について求めた。2ms 長さの先端突起付き矩形波を用いた場合、大きな加速度変化が起きている時間は、約 $10\mu\text{s}$ であった。スライダ質量 $M : 0.21\text{g}$ 、スライダとシャフト間の最大摩擦係数 $\mu_{\text{max}} : 0.42$ であり、4.3 章で上述した式 (4-1)、(4-2)、(4-3) を満たすように、スライダの締め付け力を調整した。スライダは駆動周期 250Hz で $1\mu\text{m}$ 移動するため、移動速度は 0.00025m/s となる。スライダがシャフトに固定 (スティック) されている時に $1\mu\text{m}$ 進むとし、この時間を最短で $10\mu\text{s}$ と仮定した場合、加速度は 20000m/s^2 となり、スライダのシャフトへの締め付け力は、10N となる。ロック用ねじの軸方向の推力が 10N の時、ロック用ねじの締め付けトルク T は、以下の式 (4-10) から、 0.0063Nm と求められる (図 4-16)。

$$Q = \frac{q_y}{\cos \theta} \quad (4-4)$$

$$G = \mu Q \quad (4-5)$$

摩擦力の x 成分 G_x は、

$$G_x = G \cos \theta \quad (4-6)$$

x 方向の力の合計 H_x は、

$$H_x = Q_x + G_x \quad (4-7)$$

$$H_x = Q_y \left(\frac{P}{2\pi R} + \mu \right) \quad (4-8)$$

ねじトルク T は、

$$T = HR \quad (4-9)$$

$$T = Q_y \left(\frac{P}{2\pi} + \mu R \right) \quad (4-10)$$

ねじ頂点角度 $\alpha = 30$ 度とし、

$$G = \frac{\mu Q}{\cos \alpha} \quad (4-11)$$

$$G_x = \frac{\mu Q \cos \theta}{\cos \alpha} \quad (4-12)$$

$$T = Q_y \left(\frac{P}{2\pi} + \frac{\mu R}{\cos \alpha} \right) \quad (4-13)$$

ロック用ねじの軸方向の推力 Q_y は次式となる。

$$Q_y = \frac{T}{\left(\frac{P}{2\pi} + \frac{\mu R}{\cos \alpha} \right)} \quad (4-14)$$

P:ねじピッチ 0.25mm

R:ねじ有効半径 0.419mm

μ :摩擦係数 0.5

T:ねじトルク

Q_y :軸方向の推力 10N

Q_x :円周方向の力

G:摩擦力

そこで図4-17のようにデジタルフォースゲージを用いて実験的にトルクを加えて実測値を計測した。実測したトルク T は0.0068Nm となった。実測したトルク T を用いてロック用ねじの軸方向の推力を計算すると、10.71N となった。

次に圧電インパクト駆動式微小液滴塗布機構の圧電素子に、駆動電圧波形として、先端突起付き矩形波、40V を印加した際のスライダーの動作について、レーザ変位計（LK-G35、キーエンス）を用いて計測した。実験装置の構成を図 4-18 に示す。スライダーにレーザ照射用の微細なターゲットを設置して、スライダーがシャフト上を上下に移動する状態を計測した。レーザ変位計の計測の正負の向きは図中に示すように、スライダーがレーザ変位計に近づく方向をプラスとし、離れる方向をマイナスとしている。計測結果を図 4-19(a),(b)に示す。図中の黄色線は圧電素子に入力している波形で、青線はスライダーの変位を表している。図 4-19(a)のスライダーの上方向移動では、圧電素子にプラス 40V を印加しており、圧電素子が急激に伸びている時には大きな加速度が発生していて、スライダーがシャフト上で滑って（スリップ）移動せず、その後、圧電素子が縮む時にスライダーはシャフトと一緒に（スティック）移動していると考えられる。このため、スライダーは圧電素子の縮む方向、つまり、スライダーがレーザ変位計から離れる方向に、移動する。これとは逆に、図 4-19(b)のスライダーの下方向移動では、圧電素子にマイナス 40V を印加しており、圧電素子が急激に縮んでいる時には大きな加速度が発生していて、スライダーがシャフト上で滑って（スリップ）移動せず、その後、圧電素子が伸びる時にスライダーはシャフトと一緒に（スティック）移動していると考えられる。このため、スライダーは圧電素子の伸びる方向、つまり、スライダーがレーザ変位計に近づく方向に、移動している。スライダーの上下の移動量につ

いては、圧電素子に 40V の先端突起付き矩形波を 5 ステップ分入力して、約 $3\mu\text{m}$ の移動が計測された。この約 $3\mu\text{m}$ のスライダの動きについて、各ステップでの動作をさらに詳細に調べるためにレーザ変位計の計測レンジ幅を変更し、高分解能な計測を行った。計測結果を図 4-20 に示す。図中の上の赤色は、入力波形のイメージである。青線はスライダの変位を表している。移動ステップの平均値は $0.49\mu\text{m}$ 、標準偏差は $0.33\mu\text{m}$ であった。スライダの変位の最初のステップでの移動量が、ほかのステップでの移動量に比べて大きい結果となった。この原因を調べるために、図 4-14 の実験構成で、圧電素子に 40V の先端突起付き矩形波を連続した 5 ステップで入力し、その時の圧電素子の変位を静電容量型変位計で測定した。結果を図 4-21 に示す。図中の黄色線は入力波形であり、青色線が圧電素子の変位を示している。この入力波形が示すように、5 ステップの入力している波形形状に変化は観られないが、圧電素子の変位は最初の変位の先端突起部分がほかの変位の先端突起部分と比べて大きくなっている。この理由として、圧電素子のヒステリシスループによるループのスタートポイントでの変位増加であると考えられる[2-13]。またこの先端突起部は、デジタルオシロスコープのサンプリングレートの影響で信号の全てを捉えきれておらず、実際の値よりも計測値のほうが小さく表示されていると考えられる。

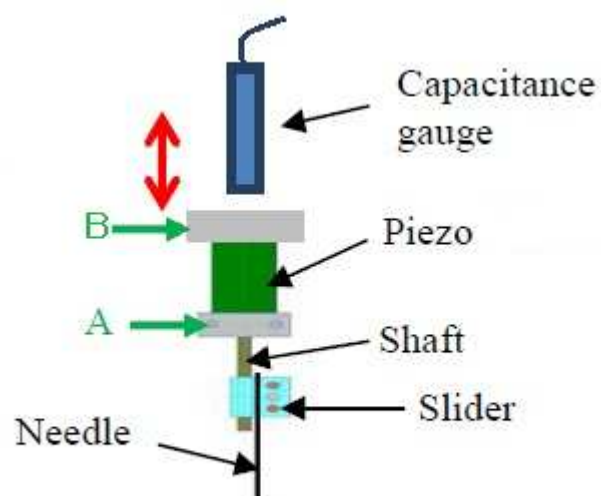


図 4-14 予備実験の構成

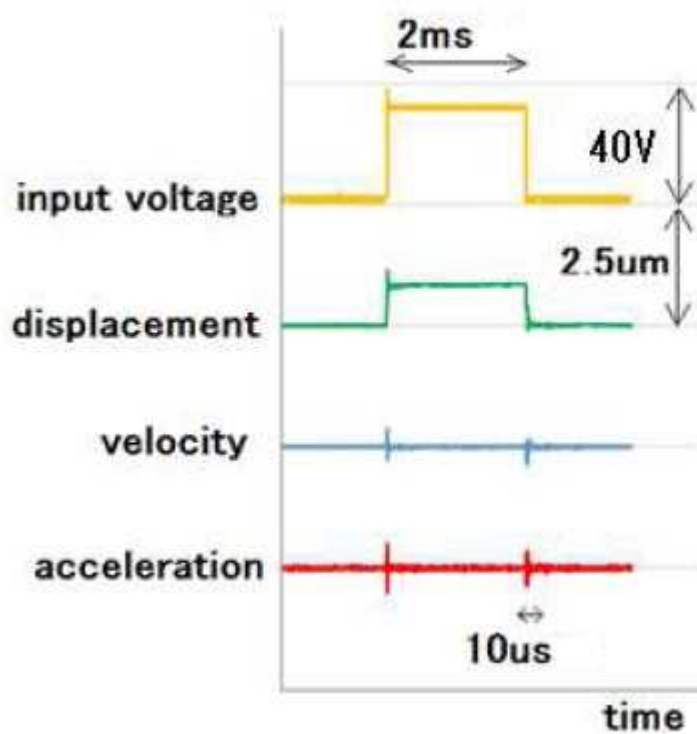


図 4-15 印加電圧と変位、速度、加速度の関係

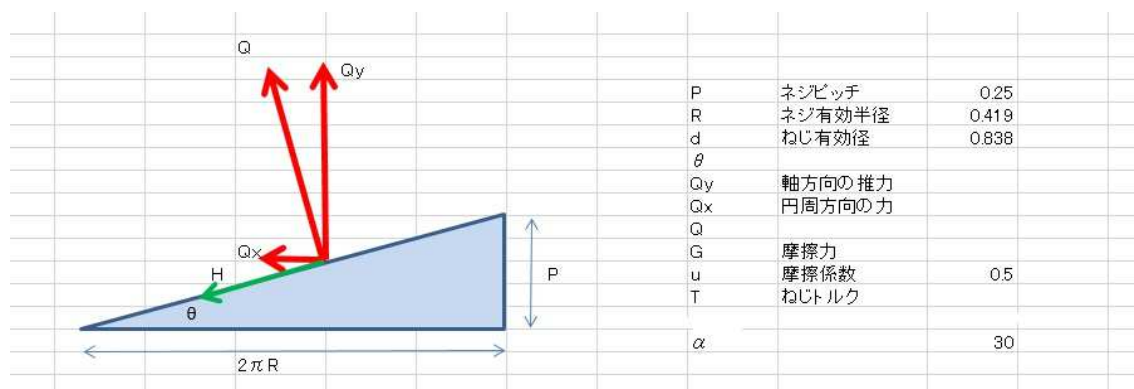


図 4-16 ロック用ねじの軸方向推力 Q_y

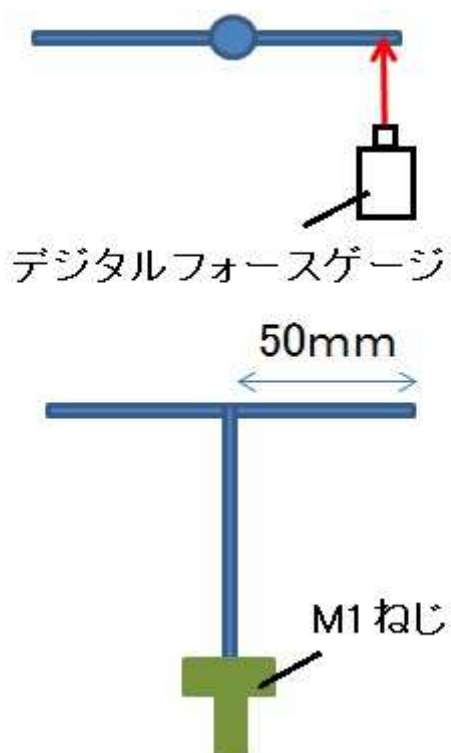


図 4-17 ねじトルク T の測定

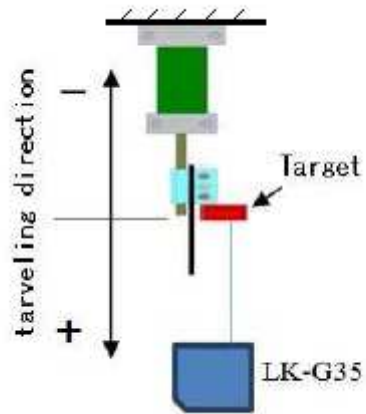
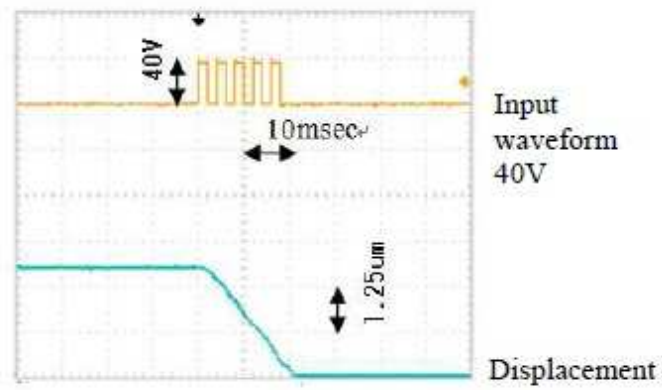
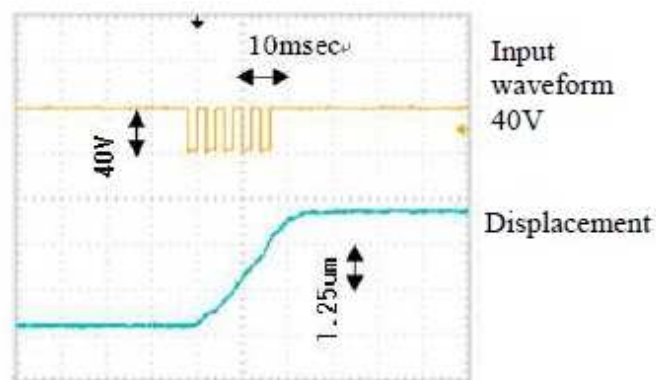


図 4-18 スライダーの変位計測



(a)スライダーの上方向移動



(b)スライダーの下方向移動

図 4-19 スライダーの上下方向移動（インターバル 2ms）

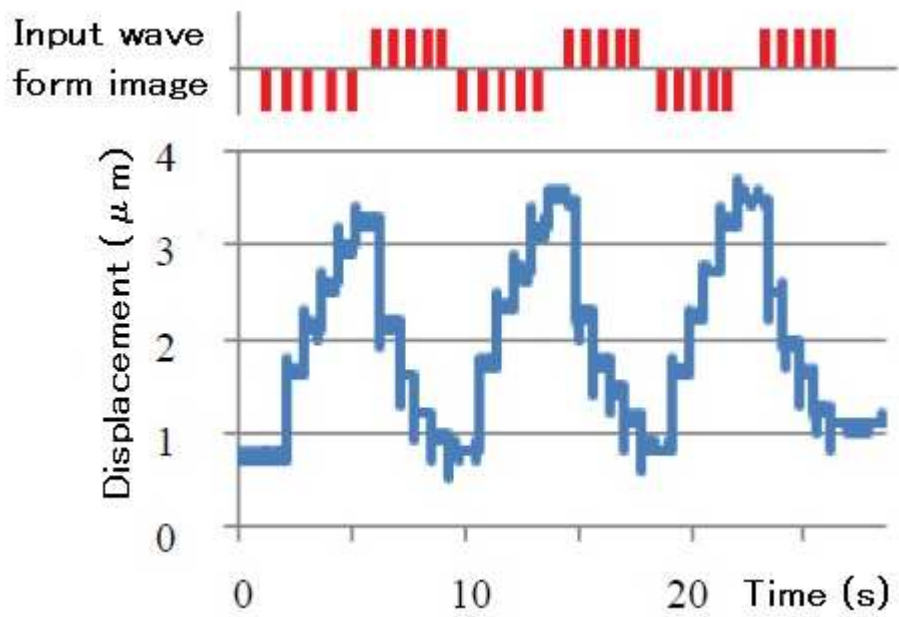


図 4-20 スライダーの上下方向移動（インターバル 1s）

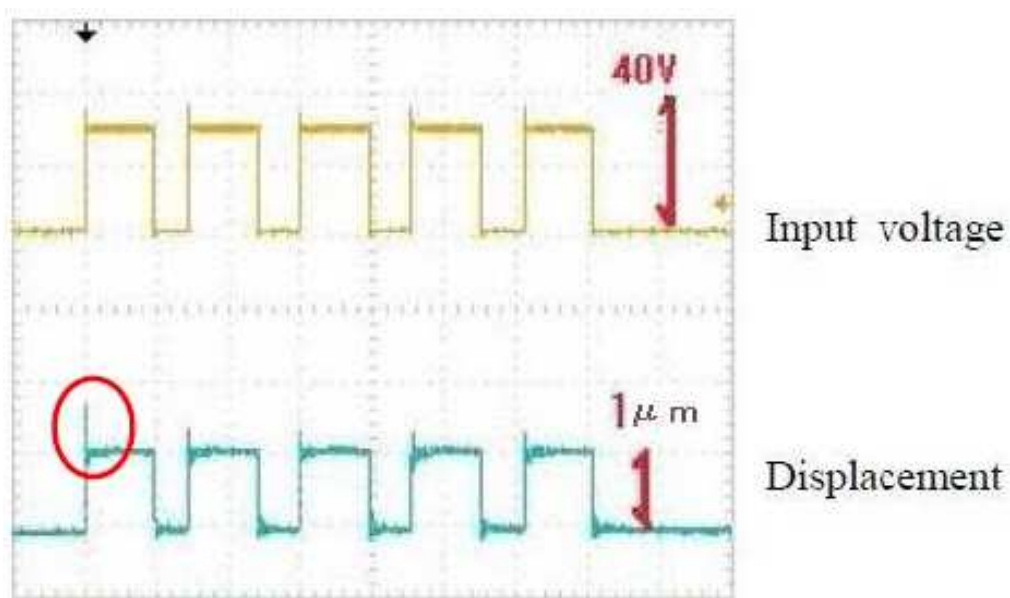


図 4-21 圧電素子のヒステリシス

4.9 微小液滴塗布装置用 XY ステージ

微小液滴塗布装置を構成する XY ステージには、2 章で述べた圧電インパクト駆動による V 溝 XY ステージを用いる[4-5,6]。V 溝 XY ステージを図 4-22 に示す。本ステージは、Y ステージ上に X ステージが搭載されている。液滴塗布する際の塗布基板は、X ステージのテーブル面上に配置される。



図 4-22 V 溝 XY ステージ（テーブル面上に塗布基板設置）

4.10 微小液滴塗布実験

図 4-23 に試作した圧電インパクト駆動を用いた微小液滴塗布装置を示す。V 溝 XY ステージ上に、微小液滴塗布機構が配置されている。微小液滴塗布機構のスライダーに取り付けられたニードルはピペット内に下ろされている。圧電インパクト駆動によりスライダーがシャフト上を上下に動き、ニードルはピペット内で上下に動く。ピペット内には、塗布する液体が充填されており、表面張力によってピペット内に保持されている。塗布基板は V 溝 XY ステージのテーブル面上に設置される。ピペット先端からニードルが塗布基板の方へ降りていくとき、ニードル先端部には微小量の液滴が付着しており、この液滴が塗布基板表面に接触し、転写されることで、液滴が塗布される。ピペット先端から塗布基板までの空間の距離（図 4-24）は、概ね $500\mu\text{m}$ 以下としている。塗布に使用する液体の粘度などの性質、ニードル先端寸法・形状によって、ニードル先端部に付着する液体の状態が変化するためである。ピペット先端から塗布基板までの空間の距離が小さすぎる場合、ニードル先端部側面に付着した液滴が塗布基板に接触し、塗布形状が悪くなることがある。また、逆に大きすぎる場合、ニードルの上下運動に必要な時間が長くなり、塗布効率が悪くなるためである。ニードル先端と基板のギャップ（図 3-9）が変動すると塗布直径が変化することがこれまでの実験からわかっている[4-7,8]。これ以外にも、ニードルを用いた微小量塗布において、擬塑性やチクソトロピーにより、ニードル先端に付着した液滴形状は変化し、塗布基板のぬれ性、微粒子の凝集等によって塗布結果には変化が生じる[4-9,10]。ニードル先端部に付着した液体と塗布基板表面の接触の状態は、マイクロスコープ(VW-6000, VH-Z500R、キーエンス)を用いて観察している。ニードル先端部に付着した液滴が塗布基板表面に接触した位置からニードルを、ピペット内の液体が充填された部分まで上昇させ、この上昇分と同等分だけニードルを下降させて、塗布を繰り返す手順とした。

始めに、先端直径 $300\mu\text{m}$ のタングステンニードル（図 4-25）とシリコンオイル粘度 $5,000\text{mPas}$ （信越化学）、塗布基板ガラス（マイクロカバーガラス $18\times 18\text{mm}$ 、松浪）を用いて塗布実験を行った（図 4-26）。以下の実験では、塗布基板はいずれも同じガラスを使用している。塗布結果はレーザ顕微鏡(VK-3510, VK-8550、キーエンス)を用いて観察した。結果を図 4-27 に示す。塗布は X、Y 方向にピッチ $650\mu\text{m}$ の間隔で行い、塗布位置と塗布直径の標準偏差はそれぞれ $1\mu\text{m}$ 、 $7\mu\text{m}$ となりオープンループ制御であるが、精密に塗布された。塗布直径は $350\mu\text{m}$ 、液滴厚さは $10\mu\text{m}$ であり、これを元に VK-8550 を用いて計算された体積は 960pL となった（図 4-28,29）。この結果は既存のメカニカルディスペンサでは実現できない。既存のメカニカルディスペンサでは粘度 $5,000\text{mPas}$ の高粘度液体を塗布した場合、 μL オーダの塗布しかできない[4-11]。よって塗布直径も大きくなり微細パターン作成に既存のディスペンサを使用することは困難である。

次に先端直径 $50\mu\text{m}$ のタングステンニードル（図 4-30）とシリコンオイル粘度 $5,000\text{mPas}$ で、塗布実験を行った。結果を図 4-31 に示す。塗布は X、Y 方向にピッチ $200\mu\text{m}$ の間隔で行い、塗布直径 $135\mu\text{m}$ が得られた。塗布ピッチを短くするとドットパターンはつながり、ラインパターンが得られる。塗布ピッチを $25\mu\text{m}$ にして作成したラインパターンを図 4-32

に示す。塗布ピッチが短いために、ドットパターンは重ねられて塗布される。その結果、線幅は $205\mu\text{m}$ となり、ドットパターンの直径よりも大きくなった。

次に先端直径 $10\mu\text{m}$ のタングステンニードル (図 4-33,34) と導電ペースト粘度 $50,000\text{mPas}$ (ナミックス) を用いて塗布実験を行った (図 4-35)。ニードル先端直径 $10\mu\text{m}$ での塗布の様子は、上記および図 4-26 の $\phi 300\mu\text{m}$ ニードルでの塗布の様子とは異なり、マイクروسコープの拡大倍率が 500 倍であり、焦点深度が浅いために、ニードル先端部 ($10\mu\text{m}$) に焦点を合わせると、ピペット (先端部外周約 1mm) には焦点が合わず、また、基板表面の塗布された液滴も極めて微量であるために観察されにくい。この極微量の塗布液滴のレーザ顕微鏡観察結果を図 4-36 に示す。塗布は X、Y 方向にピッチ $50\mu\text{m}$ の間隔で行った。塗布直径は $12\mu\text{m}$ 、液滴厚さ $4\mu\text{m}$ 、塗布体積 0.2pL が得られた (図 4-37)。非常に微量の塗布が実現した。アスペクト比は 3:1 であるが、同等の塗布直径をインクジェットで塗布すれば、アスペクト比 12:1 が限界である [3-3]。

最後に先端直径 $10\mu\text{m}$ のタングステンニードル (図 4-33,34) と導電ペースト粘度 $100,000\text{mPas}$ (セラテック) を用いて塗布実験を行った。レーザ顕微鏡観察結果を図 4-38 に示す。塗布は X、Y 方向にピッチ $50\mu\text{m}$ の間隔で行った。塗布直径は $17\mu\text{m}$ 、液滴厚さ $30\mu\text{m}$ となり、高アスペクト (約 1:2) パターンが作成できた。塗布体積は 4.7pL となった (図 4-39)。この結果は既存のスクリーン印刷、ディスペンサ、インクジェットでは実現不可能である [4-10,11,3-3]。フォトリソグラフィと同等の高アスペクトがマスクレスで実現できた [4-12]。次世代エレクトロニクスデバイスの配線、リペア、導電性パターン作成において、本試作機は有効な装置である。

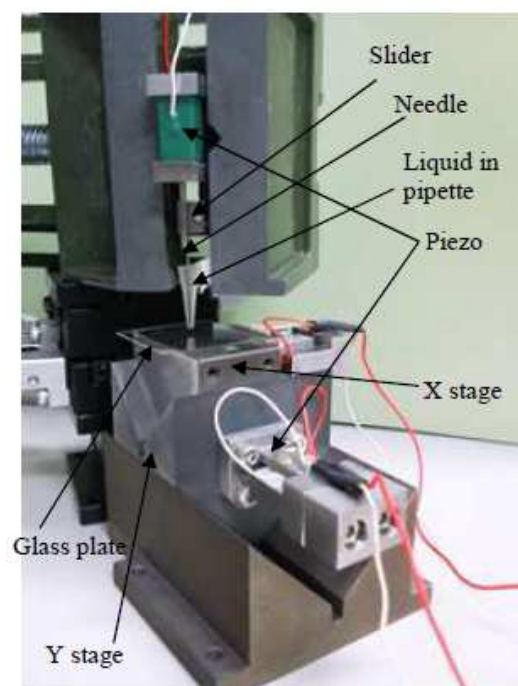


図 4-23 圧電インパクト駆動を用いた微小液滴塗布装置

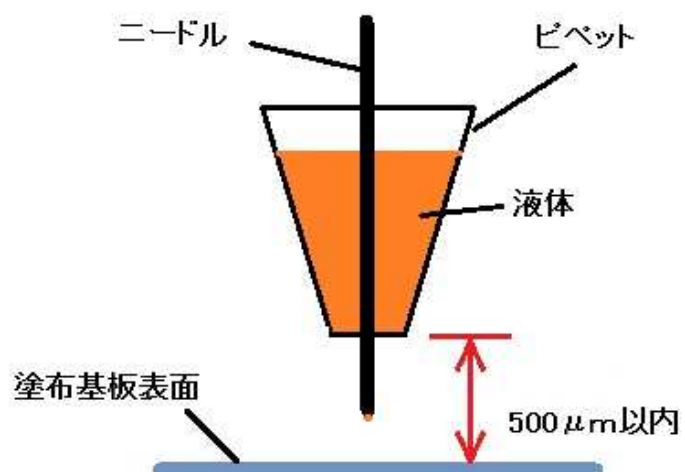


図 4-24 ピペット先端と塗布基板表面間の距離

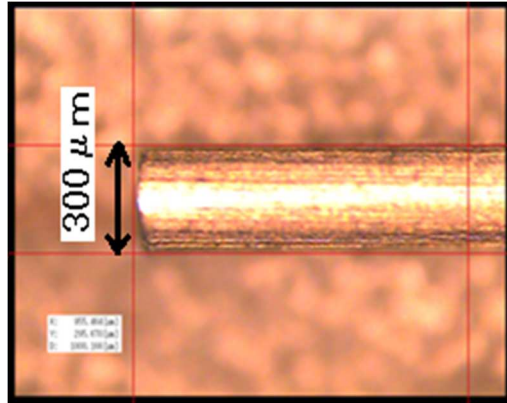


図 4-25 φ300μm ニードル (タングステン)



図 4-26 塗布の様子 (φ300μm ニードル、シリコーンオイル 5,000mPas)

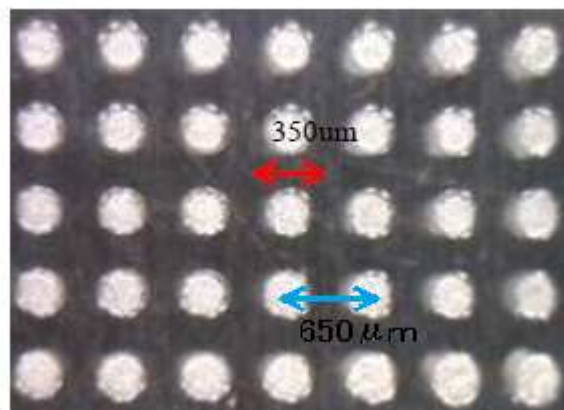


図 4-27 φ350μm (5,000mPas、シリコーンオイル)

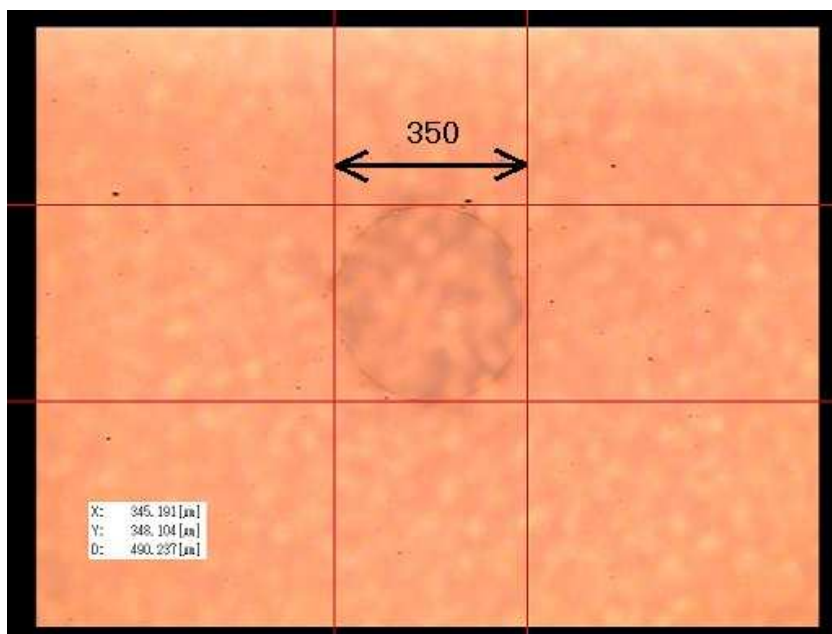


図 4-28 $\phi 350\mu\text{m}$ (5,000mPas、シリコーンオイル)

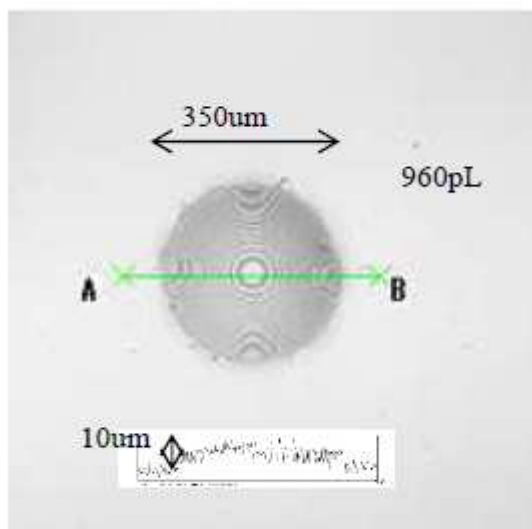


図 4-29 960pL、厚さ $10\mu\text{m}$ (5,000mPas、シリコーンオイル)

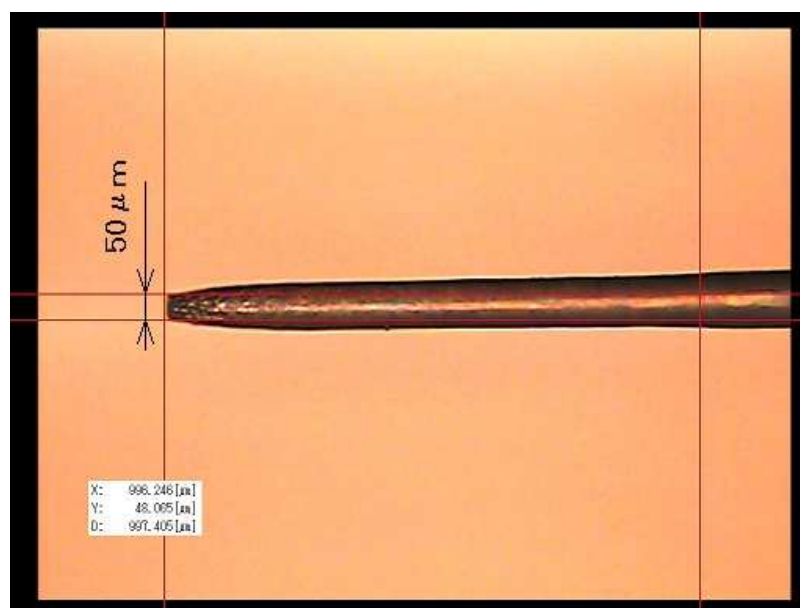


図 4-30 φ50μm ニードル (タングステン)

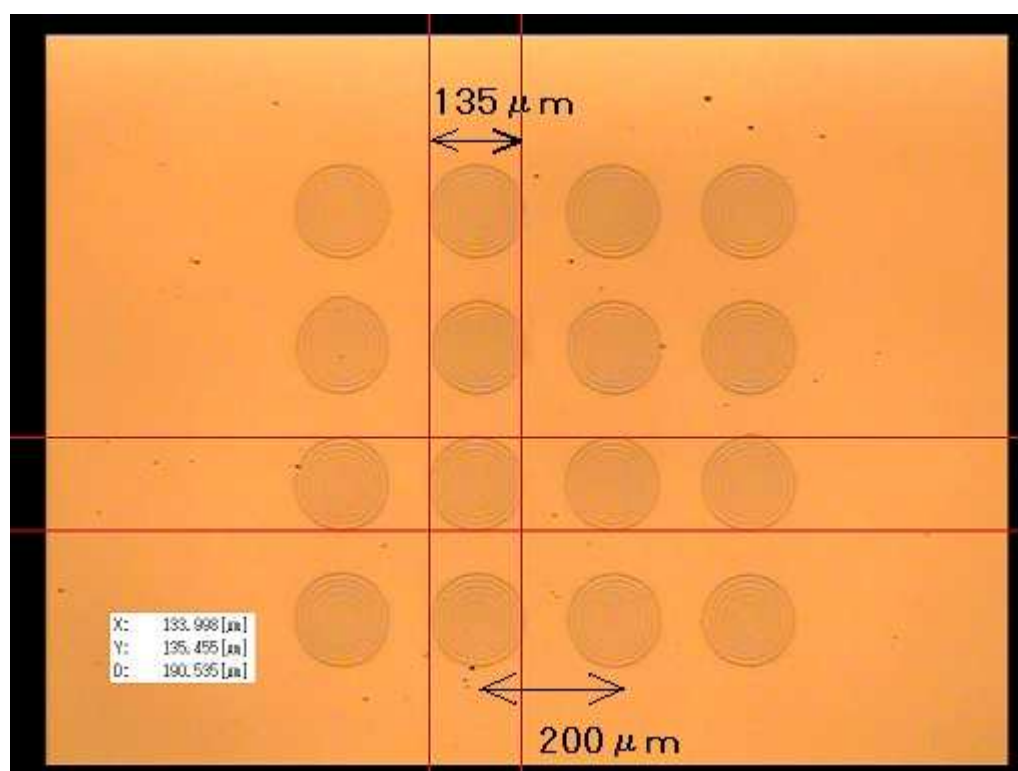


図 4-31 φ135μm (5,000mPas、シリコンオイル、ニードル φ50μm)

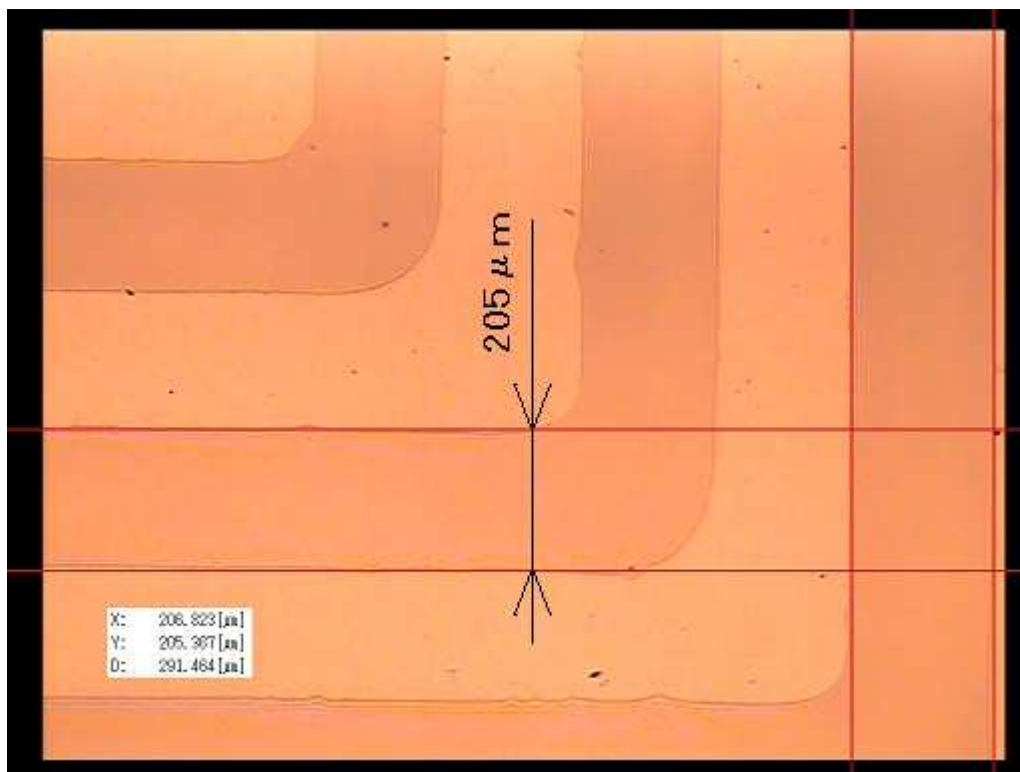


図 4-32 LINE 205 μm (5,000mPas、シリコーンオイル、ニードル $\phi 50\mu\text{m}$ 、塗布ピッチ 25 μm)

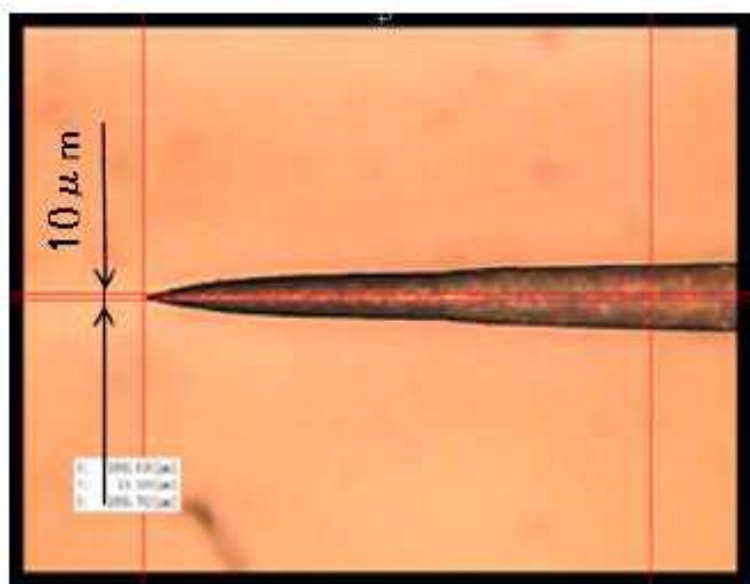


図 4-33 $\phi 10\mu\text{m}$ ニードル (タングステン)

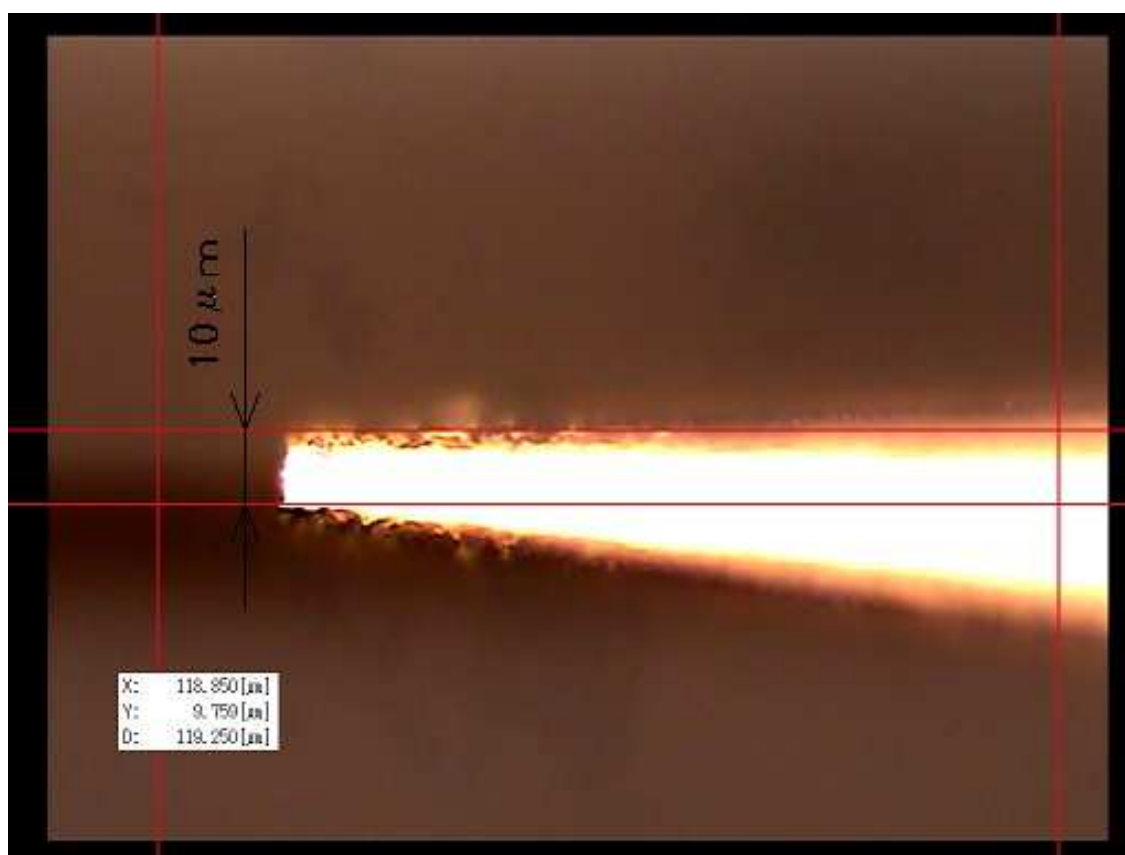


図 4-34 $\phi 10\mu\text{m}$ ニードル（先端部）

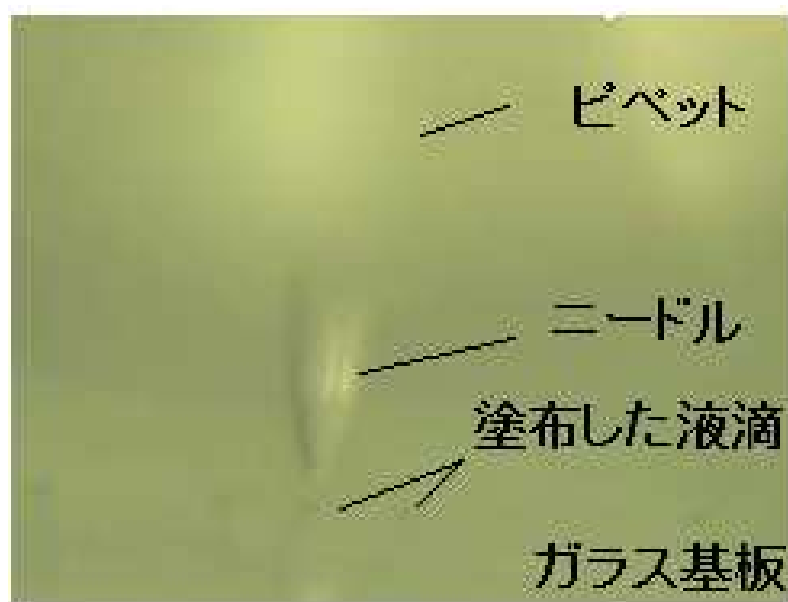


図 4-35 塗布の様子（ $\phi 10\mu\text{m}$ ニードル、導電ペースト 50,000mPas）

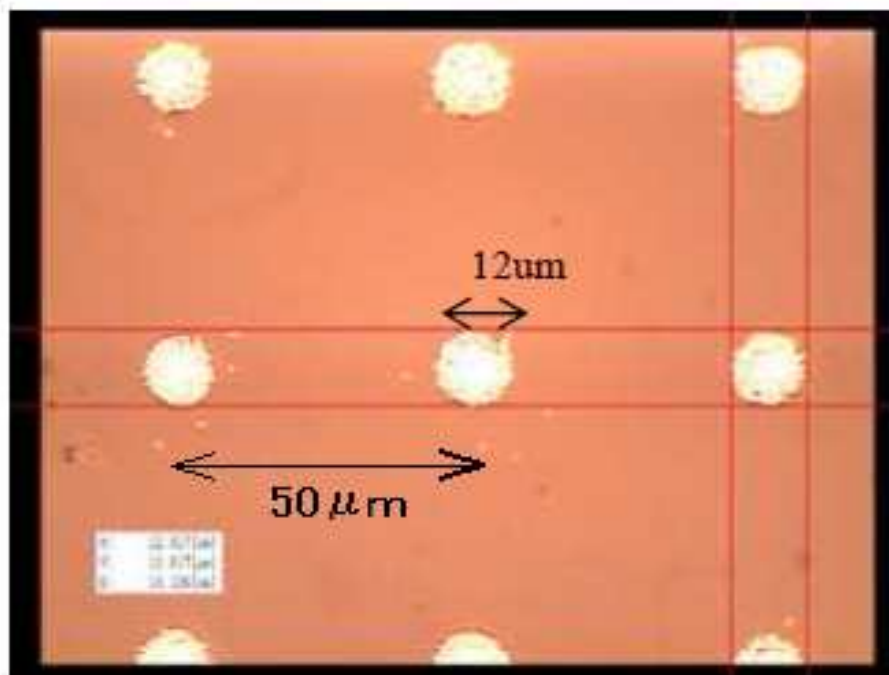


図 4-36 $\phi 12\ \mu\text{m}$ (50,000mPas、導電ペースト)

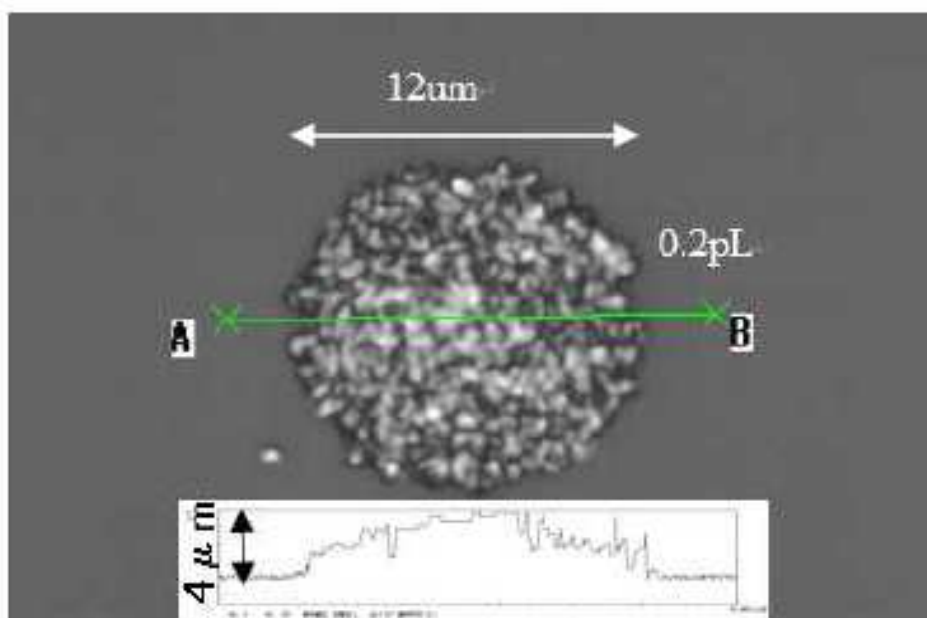


図 4-37 $0.2\ \text{pL}$ 、厚さ $4\ \mu\text{m}$ (50,000mPas、導電ペースト)

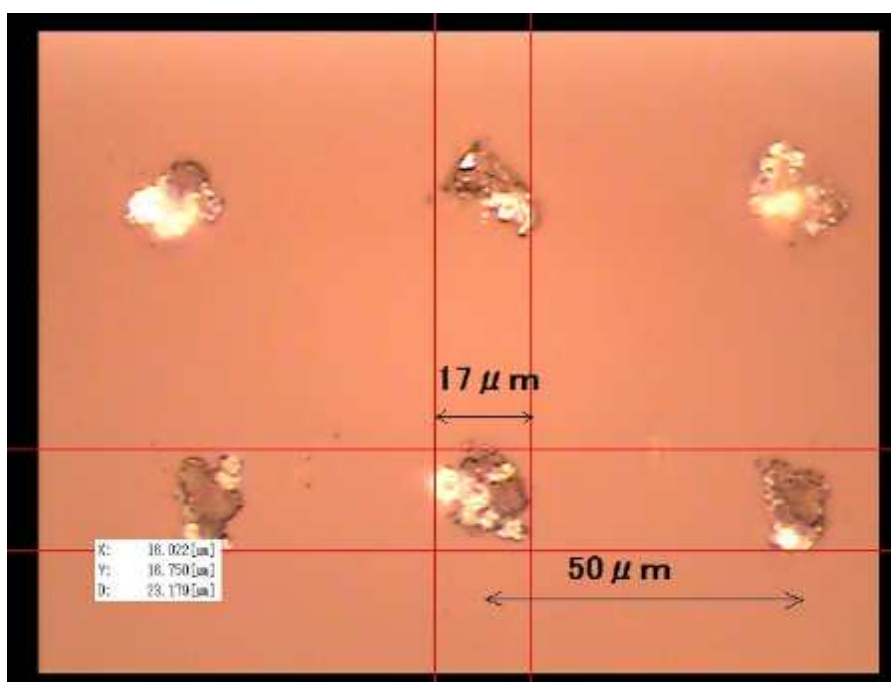


図 4-38 $\phi 17\mu\text{m}$ (100,000mPas、導電ペースト)

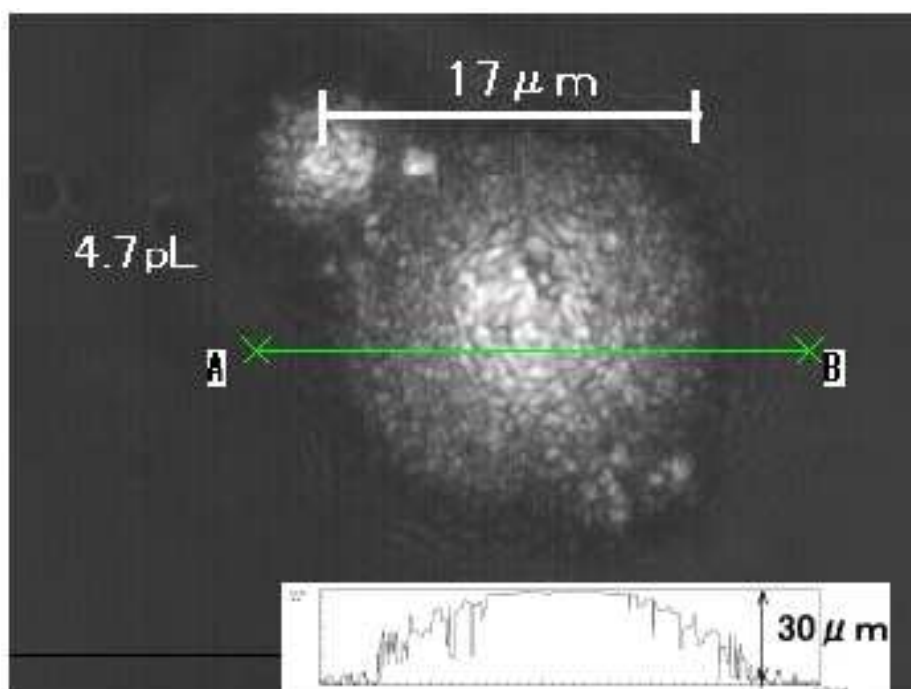


図 4-39 4.7pL、厚さ $30\mu\text{m}$ (100,000mPas、導電ペースト)

4.11 まとめ

圧電インパクト駆動を用いた微小液滴塗布装置を開発した。本装置は、圧電インパクト駆動を用いた微小液滴塗布機構と V 溝 XY ステージから構成される。圧電インパクト駆動を用いた微小液滴塗布機構は、圧電素子に接続されたシャフト、シャフトに締結されたスライダー、スライダーに固定されたニードルから構成される。液滴塗布は、ニードルが液滴の充填されたピペットを貫通し、ニードル先端に付着した微小量の液滴が塗布対象に接触して行われる。圧電インパクト駆動では、圧電素子に急速に電圧を印加すると圧電素子は急速に伸び大きな加速度を発生する。圧電素子に接続されているシャフトも大きな加速度で動き、シャフトに締結されているスライダーはシャフト上で滑り（スリップ）、動かない。次に圧電素子にゆっくりと電圧を印加すると、シャフトも小さな加速度でゆっくりと動き、この時、スライダーはシャフトと一緒に（スティック）動く。このサイクルを繰り返すことでスライダーをシャフト上で上下に精密に動かすことが可能となる。この時の圧電素子に印加する電圧波形に着目し、先端突起付き矩形波を提案し、のこぎり波と先端突起付き矩形波の加速度成分について比較した。のこぎり波に比べて先端突起付き矩形波は、1 サイクル内で発生する加速度変化が、波形前半で大、後半で小となり、安定したスティックスリップが得られることを明らかにした。試作した微小液滴塗布機構にこの先端突起付き矩形波を入力して、スライダーの移動性能を実験的に評価した。スライダーは、約 $1\mu\text{m}$ の移動分解能を有し、圧電素子のヒステリシスの影響で移動量に変化が観られるが、再現性は良好であった。V 溝 XY ステージと組み合わせることで、微小液滴塗布装置を構成した。本装置を用いて、塗布液体・粘度、ニードル先端直径寸法を変化させて塗布実験を行い、良好な塗布結果が得られた。先端直径 $300\mu\text{m}$ ニードル、粘度 5000mPas シリコンオイル、ガラス基板を用いて塗布直径 $350\mu\text{m}$ 、液滴厚さ $10\mu\text{m}$ 、体積 960pL の塗布ができた。また、実際のリペアやパターン作成で要求される仕様に近い実験として、先端直径 $10\mu\text{m}$ ニードル、粘度 50000mPas 導電ペーストを用いて、塗布直径 $12\mu\text{m}$ 、液滴厚さ $4\mu\text{m}$ 、体積は 0.2pL の塗布に成功した。また粘度 100000mPas 導電ペーストを用いて、塗布直径 $17\mu\text{m}$ 、液滴厚さ $30\mu\text{m}$ 、体積は 4.7pL の塗布に成功した。高粘度材料を用いることで、高アスペクト比を持つパターンの作成ができた。目標値は塗布直径 $10\mu\text{m}$ 以下、粘度 50000mPas 以上であったので、塗布直径は達成できなかった。これまでの結果から、圧電インパクト駆動を用いた微小液滴塗布装置が実用化に足る装置であると考えられる。また、圧電インパクト駆動を用いた微小液滴塗布機構は、長ストローク、高精度位置決め、小型を実現し、将来的に多軸化可能であり、より高効率な塗布が期待できる。

第5章 結論

5.1 おわりに

本論文は全5章で構成されており、各章では以下の内容について述べた。

第1章「緒論」では、デバイスの小型化に伴う超精密組立作業の現状と必要性について触れ、製造装置には高分解能な位置決め、可動範囲の増加、操作性向上、小型化が望まれていることを述べた。そして圧電素子を用いた超精密位置決め機構の実用化例などについて説明し、圧電インパクト駆動がこれらの装置要求に適していることを述べた。そこで組立部品の精密位置決めと微量の液滴塗布を可能とする製造装置開発を研究目的として、圧電インパクト駆動を用いた超精密XYステージと微小液滴塗布機構を提案した。

第2章「圧電インパクト駆動によるBlu-ray Disc用ピックアップレンズの調芯機構」では、最初に圧電インパクト駆動による超精密位置決めの動作原理について説明した。圧電素子の駆動電圧波形に、のこぎり波形を用いた場合の駆動周波数と移動体の移動量の関係について示した。次にレーザ干渉計を用いたBlu-ray Disc用ピックアップレンズの調芯方法と調芯機構の仕様について説明した。そして圧電インパクト駆動をBlu-ray Disc用ピックアップレンズの調芯機構に適用し、開発した圧電インパクト駆動式V溝XYステージについて説明した。V溝XYステージの位置決め性能について計測結果を示し、X、Yステージそれぞれの最小位置決め分解能を明らかにした。レンズ把持部をV溝XYステージ上に搭載し、レンズ調芯用のV溝XYステージ機構を構成した。レンズ把持部搭載後のV溝XYステージの位置決め性能、把持によるレンズの傾きについて実験評価し、位置決め分解能85nm、レンズ傾斜角度0.01度以下の良好な結果を得た。レーザ干渉計（青色、波長405nm）を用いて干渉縞を観察しながらXYステージを駆動させて実際にレンズ調芯を行い、偏芯のない位置決めに成功していることを述べ、V溝XYステージ機構がレンズ調芯作業において有用であることを示した。

第3章「ニードル式液滴塗布装置とニードル先端接触検知法」では、まずニードル式液滴塗布装置の液滴塗布原理について述べた。ニードル式液滴塗布装置を用いて塗布を行う際には塗布ギャップを管理する必要がある。塗布ギャップが変動すると塗布直径がばらつき、また塗布ギャップがゼロの時、ニードルと塗布基板は衝突し損傷する。このためニードルと塗布基板の接触状態を検知する必要がある。そこでニードル先端部に付着した液体の塗布基板上への接触検知方法に着目し、オンマシンで接触検知する方法を提案した。ここではニードルを機械共振機構で微小振動させ、先端部の液滴が対象物に接触した瞬間に機械共振点が変わることを利用して、接触検知を行った。ニードル直径、液体粘度、塗布基板を変化させて、ニードル先端液滴の塗布基板への接触検知実験を行った。ニードル直径100 μ mを用いてシリコンオイル粘度100～100,000mPasの高粘度液体を用いて実験を行い、接触時に共振周波数や振幅の変化から、ニードル先端部の液滴が塗布基板への接触した瞬間の検知に成功した。またニードル振動を用いた塗布により、塗布した液滴の直径ばらつきを低減することができた。

第4章「圧電インパクト駆動による微小液滴塗布機構」では、最初に微小液滴塗布機構の構成と塗布原理について説明した。次に微小液滴塗布機構に用いる圧電インパクト駆動の動作原理について述べた。まず圧電素子に印加する駆動電圧波形に着目し、先端突起付き矩形波を提案し、従来ののこぎり波形との特性の相違について比較し、得られる加速度成分について説明した。得られた加速度から移動体の締め付け力を決定し、圧電インパクト駆動式微小液滴塗布機構を試作した。試作機に先端突起付き矩形波を入力し、移動性能評価実験を行い、1 μm の位置決め分解能が得られた。さらに圧電インパクト駆動される V 溝 XY ステージと組み合わせて微小液滴塗布装置を構成した。ニードル直径と液体粘度を変化させて、塗布実験を行った。本試作機を用いて高粘度導電ペースト (50,000mPas) を直径 12 μm で塗布することに成功しており、微小液滴塗布作業において本試作機が有用であることを示した。また圧電インパクト駆動式微小液滴塗布機構は小型であるため、複数台配置することで高効率な塗布が実現できることが期待できる。

5.2 今後の課題

本研究では、圧電インパクト駆動を用いた V 溝 XY ステージと微小液滴塗布機構を開発し、その有用性を示した。以下に、本研究の今後の課題について述べる。

今後の課題として、圧電インパクト駆動式ニードルの位置決め機構に共振検知機能を付加し、ニードル先端の液滴と対象面と接触状況を計測できるようにする。ニードル先端位置の閉ループ制御を実施することで、さらに高い再現性の高粘度微小液滴塗布が可能になると考えられる。

関連論文の印刷公表の方法及び時期

- (1) Yuuka Irie, Junichi Kubo and Takahiro Fujioka, Hisayuki Aoyama, Takashi Usuda
「Piezo-Impact-Driven X-Y Stage and Precise Sample Holder for Accurate Microlens Alignment」平成 21 年 8 月 Journal of Robotics and Mechatronics, Vol.21, pp. 635-641
(第 2 章に関連)
- (2) Shinnosuke Hirata, Kazuki Hirose, Yuuka Irie, Hisayuki Aoyama
「Improvement of the needle-type dispenser for precise micro-droplet dispensation—Gap measurement between the needle tip and the target surface based on needle vibration—」
平成 24 年 10 月 Journal of Robotics and Mechatronics, Vol. 24, pp. 284-290 (第 3 章に関連)
- (3) Shinnosuke Hirata, Kazuki Hirose, Yuuka Irie, Hisayuki Aoyama
「Evaluation of microgap control of needle-type dispenser for precise microdroplet dispensation」
平成 25 年 7 月 Journal of Robotics and Mechatronics, Vol.25, pp. 848-854
(第 3 章に関連)
- (4) Yuuka Irie, Shinnosuke Hirata, Chisato Kanamori, Hisayuki Aoyama
「Impact piezo driven micro dispenser and precise miniature XY stage」
平成 27 年 Journal of Robotics and Mechatronics Vol. 27, pp. 259-266 (第 4 章に関連)